CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS 16.1 结构分析工程应用实例解析

张朝晖 主编

第4版







关注“机械工业出版社计算机分社”官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

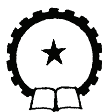
LANZAROTE
Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS 16.1 结构分析工程应用实例解析

第 4 版

张朝晖　主编



机 械 工 业 出 版 社

本书从实例分析与计算入手，详细介绍 ANSYS 16.1 有限元软件的功能与技巧。全书根据不同的学科及工程应用分为 8 章，内容主要包括 ANSYS 16.1 简介、ANSYS 16.1 建模与网格划分、ANSYS 16.1 结构线性静力分析、ANSYS 16.1 结构动力学分析、ANSYS 16.1 结构非线性分析、ANSYS 16.1 复合材料结构分析、ANSYS 16.1 结构疲劳分析、ANSYS 16.1 结构断裂分析。本书内容新颖丰富、涉及领域广泛，让读者在掌握 ANSYS 16.1 软件的同时能够学习实际工程问题的分析思路、方法和经验，并能够轻松解决相关领域所出现的问题。

本书适合理工类院校相关专业的硕士研究生、博士研究生及教师使用，可以作为高等院校学生及科研院所研究人员学习 ANSYS 16.1 有限元软件的教材，也可以作为从事相关领域科学技术研究的工程技术人员使用 ANSYS 16.1 软件时的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 16.1 结构分析工程应用实例解析 / 张朝晖主编. —4 版. —北京：机械工业出版社，2016.6

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）

ISBN 978-7-111-54312-1

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①有限元分析-应用软件 Ⅳ. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 163792 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦 责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞 责任印制：

印刷（ 装订）

2016 年 8 月第 4 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 35 印张 • 858 千字
0001－4000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-7-54312-1
定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：（010）88361066
读者购书热线：（010）68326294
（010）88379203

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长，都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用较早，使用也较为广泛。目前，其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在建筑工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

很多行业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，要将软件技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书按照相应的工程应用领域划分为三个系列：机械篇、电子篇和建筑篇。其中，机械篇涉及 AutoCAD、Pro/Engineer、UG、CAXA、SolidWorks、Inventor、Mastercam、ANSYS 等有关机械设计、性能分析、制造技术方面的应用；电子篇涉及 Protel、VHDL/FPGA、MATLAB、LabVIEW 等有关电子、通信领域的电子电路设计、印制电路板、电路仿真等方面的应用；建筑篇主要包括 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量极具代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本套丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

ANSYS 是集结构、流体、电场、磁场、声场、热分析于一体的大型通用有限元分析软件。它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer、Nastran、Algor、I-DEAS， AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一，也是迄今为止世界范围内唯一通过 ISO9001 质量体系认证的分析设计类软件。在 ANSYS 公司相继收购 ICEM、CFX、CENTURY DYNAMICS、AAVID THERMALLOY、FLUENT 等世界著名有限元分析软件制造公司并将其产品和 ANSYS 整合之后，ANSYS 实际上已成为世界上最通用和有效的商用有限元软件之一。

1. 本书意义

本书是《ANSYS 8.0 结构分析及实例解析》一书的第 4 版。该书前 3 版出版之后，得到了同行的广泛关注和广大读者的认可及厚爱，来电来函甚多，其中不乏赞美之辞，编者对此表示十分感激。应读者和出版社的要求，编者根据 ANSYS 最新版本，对前 3 版进行了深入细致地修订，并添加了较多新内容，使得全书内容更丰富、实例更具代表性，体现出更强的工程应用价值；同时，第 4 版图书采纳了读者的合理建议，增加了例题分析内容，使读者在动手完成实例分析之前对所做例题了然于胸。

本书所有例题均经过精心设计与筛选，代表性强，并具有实际的工程应用背景。每个例题都通过图形用户界面及命令流两种方式向读者进行详细介绍。对于渴望入门的新手来说，通过对第 1、2 章相关知识的学习，可以在较短的时间内快速入门；对于希望解决实际工程问题的资深用户而言，也可以通过参考其中类似例题的分析思路和求解过程圆满完成任务。

本书穿插一些特色段落。**提示**：适当地给读者一些提示，使读者能迅速理解编者的分析思路和分析方法；**注意**：在容易出现问题的地方及时提醒读者注意，避免读者犯错误，节约读者宝贵的时间；**技巧**：指点读者一些捷径，透露一些高招，让读者事半功倍，技高一筹；**试一试**：让读者在学习完毕之后，有一个大展身手的好机会。

本书由北京理工大学的张朝晖负责策划和主要编写。本书作者根据多年的教学经验、使用心得以及多部 ANSYS 及其相关著作的编写思路总结，并通过和广大读者的深入交流，编著了本书。全书实例具有很高的实践操作可行性和很强的参考实用性。

2. 本书导读

本书共分 8 章，第 1 章是概述，主要介绍 ANSYS 16.1 程序的发展过程、技术特点、使用环境、程序功能、创新之处、文件系统、基本操作及 ANSYS 16.1 的结构分析过程。

第 2 章为 ANSYS 16.1 模型建立部分，主要从 ANSYS 程序的特点出发，论述直接建模法、自底向上建模法、自顶向下建模法 3 种建立模型的方法。

第 3 章为结构线性静力分析部分，主要从结构静力学的角度出发，论述了几类典型的结构静力学问题及其求解方法，包括平面应力问题、平面应变问题、轴对称问题、梁分析问

题、桁架分析问题、壳分析问题、接触分析问题。

第 4 章为结构动力学分析部分，主要论述模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析及谱分析等几类典型的结构动力学问题的求解步骤、技巧与方法。

第 5 章为结构非线性分析部分，主要以几何非线性、材料非线性及状态非线性这 3 类工程结构非线性为出发点，论述几种典型的结构非线性问题的求解方法：屈曲分析、弹塑性分析、壳分析、膜结构分析、蠕变松弛分析、超弹分析、DP 材料分析、接触分析、大塑性变形分析。

第 6 章为复合材料结构分析部分，主要论述运用 ANSYS 程序解决复合材料梁、复合材料层合板问题的步骤、技巧与方法。

第 7 章为结构疲劳分析部分，主要论述运用 ANSYS 程序进行结构疲劳分析的步骤、技巧与方法。

第 8 章为结构断裂分析部分，主要论述运用 ANSYS 程序进行结构断裂分析的步骤、技巧与方法，包括二维断裂和三维断裂问题。

3. 本书约定

本书以 Windows 8.1 为操作平台介绍 ANSYS 16.1 软件，其他可以兼容的平台包括：Windows 7 及以上版本操作系统。为了便于阅读理解，本书进行如下约定：

- 本书中出现的菜单、命令均为英文并附有中文注释。此外，为了语句更简洁易懂，本书利用“|”表示上下级菜单或命令的关联，比如 Utility Menu | File | Resume From，表示选择工具菜单中的 File 菜单，执行其中的 Resume From 命令；又如 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines，表示在主菜单中依次选择 Preprocessor、Modeling、Reflect、Lines 菜单，最后出现 Reflect Lines 菜单，其他依次类推。
- 在没有特别指明时，“单击”、“双击”和“拖动”表示用鼠标左键单击、双击和拖动。
- 为版式统一起见，本书所有命令流中的标点符号均采用中文格式，读者在练习过程中需将其修正为英文格式。
- 命令流中“!”号后面的中文为解释说明部分，读者在使用命令流过程中不必输入。

本书主要由张朝晖编写，参与编写的还有刘颖、王鲁、冯新娅、李云凯、程焕武、王虎、王琳、胡正阳、张淑玲、苗杰、罗杰、贵大勇、黎振、姜开宇、赵丹阳、唐合存、陈为为、苗凯、廖秋尽、陈焕德、梁媛、魏赛和神祥博参加了本书部分章节的编写。由于编者水平有限，书中错误与缺点在所难免，敬请广大读者批评指正，欢迎业内人士来电来函共同探讨。

作者 E-mail：zhang@bit.edu.cn

编 者



目 录

出版说明

前言

第 1 章 概述 …… 1

1.1 ANSYS 16.1 简介 …… 1

1.1.1 ANSYS 16.1 发展过程 …… 1

1.1.2 ANSYS 16.1 技术特点 …… 2

1.1.3 ANSYS 16.1 使用环境 …… 2

1.1.4 ANSYS 16.1 程序功能 …… 3

1.1.5 ANSYS 16.1 创新之处 …… 6

1.1.6 ANSYS 16.1 文件系统 …… 9

1.2 ANSYS 16.1 基本操作 …… 9

1.2.1 ANSYS 16.1 启动与设置 …… 9

1.2.2 ANSYS 16.1 用户界面 …… 10

1.2.3 退出 ANSYS 16.1 …… 12

1.3 ANSYS 16.1 结构分析 …… 12

1.3.1 ANSYS 16.1 结构分析介绍 …… 12

1.3.2 ANSYS 16.1 结构分析过程 …… 13

1.4 ANSYS 16.1 使用技巧 …… 15

1.4.1 几何模型修正技巧——布尔操作 …… 15

1.4.2 图形显示设置技巧——字体设置与窗口显示 …… 33

1.4.3 结果文件输出技巧——图形复制与输出 …… 36

1.4.4 生成动画文件技巧——动画文件的生成与存储 …… 37

第 2 章 ANSYS 16.1 模型建立及实例详解 …… 39

2.1 模型建立基本过程 …… 39

2.1.1 模型介绍 …… 39

2.1.2 模型建立方法 …… 39

2.1.3 ANSYS 坐标系与工作平面 …… 40

2.1.4 实体建模 …… 45

2.1.5 网格划分 …… 57

2.2 直接法实体建模实例详解 …… 64

2.2.1 问题描述 …… 64

2.2.2 问题分析 …… 65

2.2.3 求解步骤 …… 65

2.2.4 命令流 …… 72

2.3 自底向上建模方法实例详解 …… 73

2.3.1 问题描述 …… 73

2.3.2 问题分析 …… 74

2.3.3 求解步骤 …… 74

2.3.4 命令流 …… 81

2.4 自顶向下建模方法实例详解 …… 83

2.4.1 问题描述 …… 83

2.4.2 问题分析 …… 83

2.4.3 求解步骤 …… 83

2.4.4 命令流 …… 93

第 3 章 ANSYS 16.1 结构线性静力分析及实例详解 …… 96

3.1 结构线性静力分析基本过程 …… 96

3.1.1 结构静力分析介绍 …… 96

3.1.2 结构线性静力分析基本步骤 …… 96

3.2 平面应力问题分析实例详解——带孔薄板内部应力集中分析 …… 100

3.2.1 问题描述 …… 100

3.2.2 问题分析 …… 100

3.2.3 求解步骤 …… 100

3.2.4 命令流 …… 107

3.3 平面应变问题分析实例详解——输气管道受力分析 …… 109

3.3.1 问题描述 …… 109

3.3.2 问题分析 …… 109

3.3.3 求解步骤 …… 109

3.3.4 命令流 …… 115

3.4 轴对称问题分析实例详解——轴类零件受拉分析 …… 117

3.4.1 问题描述……117
3.4.2 问题分析……117
3.4.3 求解步骤……117
3.4.4 命令流……124
3.5 梁分析实例详解——工字梁端面受力分析……125
3.5.1 问题描述……125
3.5.2 问题分析……125
3.5.3 求解步骤……125
3.5.4 命令流……130
3.6 桁架分析实例详解——三角桁架受力分析……131
3.6.1 问题描述……131
3.6.2 问题分析……131
3.6.3 求解步骤……131
3.6.4 命令流……136
3.7 壳分析实例详解——薄壁圆筒受力分析……138
3.7.1 问题描述……138
3.7.2 问题分析……138
3.7.3 求解步骤……138
3.7.4 命令流……145
3.8 接触分析实例详解——钢球和刚性平面接触分析……146
3.8.1 问题描述……146
3.8.2 问题分析……147
3.8.3 求解步骤……147
3.8.4 命令流……157
第 4 章 ANSYS 16.1 结构动力学分析及实例详解……160
4.1 结构动力学分析基本过程……160
4.1.1 模态分析……160
4.1.2 谐响应分析……167
4.1.3 瞬态动力学分析……171
4.1.4 谱分析……176
4.2 模态分析实例详解——飞机机翼模态分析……180
4.2.1 问题描述……180
4.2.2 问题分析……180
4.2.3 求解步骤……180
4.2.4 命令流……189
4.3 模态分析实例详解——谐振器模态分析……190
4.3.1 问题描述……190
4.3.2 问题分析……190
4.3.3 求解步骤……190
4.3.4 命令流……195
4.4 谐响应分析实例详解——弹簧质量系统受谐载荷……197
4.4.1 问题描述……197
4.4.2 问题分析……197
4.4.3 求解步骤……197
4.4.4 命令流……203
4.5 谐响应分析实例详解——有预应力的吉他弦谐响应分析……204
4.5.1 问题描述……204
4.5.2 问题分析……205
4.5.3 求解步骤……205
4.5.4 命令流……211
4.6 瞬态动力学分析实例详解——钟摆摆动分析……212
4.6.1 问题描述……212
4.6.2 问题分析……212
4.6.3 求解步骤……213
4.6.4 命令流……219
4.7 瞬态动力学分析实例详解——滑动摩擦生热分析……220
4.7.1 问题描述……220
4.7.2 问题分析……221
4.7.3 求解步骤……221
4.7.4 命令流……231
4.8 谱分析实例详解——地震位移谱作用下的板梁结构响应……233
4.8.1 问题描述……233
4.8.2 问题分析……234
4.8.3 求解步骤……234
4.8.4 命令流……243

第 5 章　ANSYS 16.1 结构非线性分析及实例详解…………………… 246
5.1　非线性分析基本过程……………… 246
5.1.1　结构非线性分析…………………… 246
5.1.2　几何非线性分析…………………… 251
5.1.3　材料非线性分析…………………… 253
5.1.4　状态非线性分析…………………… 258
5.1.5　非线性分析步骤…………………… 270
5.2　几何非线性实例详解——圆柱壳体受力分析…………………… 275
5.2.1　问题描述………………………… 275
5.2.2　问题分析………………………… 276
5.2.3　求解步骤………………………… 276
5.2.4　命令流 ………………………… 286
5.3　几何非线性实例详解——细长杆屈曲分析………………………… 287
5.3.1　问题描述………………………… 287
5.3.2　问题分析………………………… 288
5.3.3　求解步骤………………………… 288
5.3.4　命令流 ………………………… 295
5.4　几何非线性实例详解——金属圆盘弹塑性分析…………………… 296
5.4.1　问题描述………………………… 296
5.4.2　问题分析………………………… 297
5.4.3　求解步骤………………………… 297
5.4.4　命令流 ………………………… 309
5.5　几何非线性实例详解——膜结构分析…………………………311
5.5.1　问题描述…………………………311
5.5.2　问题分析…………………………311
5.5.3　求解步骤…………………………311
5.5.4　命令流 ………………………… 320
5.6　材料非线性实例详解——螺栓蠕变松弛分析…………………… 322
5.6.1　问题描述………………………… 322
5.6.2　问题分析………………………… 323
5.6.3　求解步骤………………………… 323
5.6.4　命令流 ………………………… 329
5.7　材料非线性实例详解——橡胶圆筒受压分析……………………330
5.7.1　问题描述……………………………330
5.7.2　问题分析……………………………330
5.7.3　求解步骤……………………………331
5.7.4　命令流 ……………………………337
5.8　材料非线性实例详解——圆盘大应变分析…………………………338
5.8.1　问题描述……………………………338
5.8.2　问题分析……………………………338
5.8.3　求解步骤……………………………338
5.8.4　命令流 ……………………………348
5.9　材料非线性实例详解——铁桩插入土壤分析……………………350
5.9.1　问题描述……………………………350
5.9.2　问题分析……………………………350
5.9.3　求解步骤……………………………350
5.9.4　命令流 ……………………………360
5.10　状态非线性实例详解——卡头压进卡座的力学过程分析……362
5.10.1　问题描述 …………………………362
5.10.2　问题分析 …………………………362
5.10.3　求解步骤 …………………………363
5.10.4　命令流……………………………380
5.11　状态非线性实例详解——铜柱体撞击刚性墙分析 ………………386
5.11.1　问题描述 …………………………386
5.11.2　问题分析 …………………………387
5.11.3　求解步骤 …………………………387
5.11.4　命令流……………………………393
5.12　状态非线性实例详解——挤压过程分析……………………………394
5.12.1　问题描述 …………………………394
5.12.2　问题分析 …………………………394
5.12.3　求解步骤 …………………………395
5.12.4　命令流……………………………405
5.13　状态非线性实例详解——LS–DYNA 程序分析锻压过程………………………………………407
5.13.1　问题描述 …………………………407

5.13.2 问题分析 …… 407
5.13.3 求解步骤 …… 407
5.13.4 命令流 …… 416
5.14 状态非线性实例详解——LS-DYNA 程序分析弹靶作用过程 …… 418
5.14.1 问题描述 …… 418
5.14.2 问题分析 …… 419
5.14.3 求解步骤 …… 419
5.14.4 命令流 …… 427
第 6 章 ANSYS 16.1 复合材料结构分析及实例详解 …… 429
6.1 复合材料结构分析基本过程 …… 429
6.1.1 复合材料介绍 …… 429
6.1.2 建立复合材料模型 …… 429
6.2 复合材料结构分析实例详解——复合材料层合板结构分析 …… 435
6.2.1 问题描述 …… 435
6.2.2 问题分析 …… 436
6.2.3 求解步骤 …… 436
6.2.4 命令流 …… 446
6.3 复合材料结构分析实例详解——层合板受压分析 …… 448
6.3.1 问题描述 …… 448
6.3.2 问题分析 …… 449
6.3.3 求解步骤 …… 449
6.3.4 命令流 …… 465
6.4 复合材料结构分析实例详解——长纤维增强复合材料梁热膨胀分析 …… 467
6.4.1 问题描述 …… 467
6.4.2 问题分析 …… 468
6.4.3 求解步骤 …… 468
6.4.4 命令流 …… 477
6.5 复合材料结构分析实例详解——复合材料梁弯曲分析 …… 478
6.5.1 问题描述 …… 478
6.5.2 问题分析 …… 479
6.5.3 求解步骤 …… 479
6.5.4 命令流 …… 489
第 7 章 ANSYS 16.1 结构疲劳分析及实例详解 …… 491
7.1 结构疲劳分析基本过程 …… 491
7.1.1 结构疲劳介绍 …… 491
7.1.2 疲劳分析步骤 …… 492
7.2 结构疲劳分析实例详解——带孔板状构件疲劳分析 …… 494
7.2.1 问题描述 …… 494
7.2.2 问题分析 …… 494
7.2.3 求解步骤 …… 495
7.2.4 命令流 …… 509
第 8 章 ANSYS 16.1 结构断裂分析及实例详解 …… 511
8.1 结构断裂分析基本过程 …… 511
8.1.1 结构断裂介绍 …… 511
8.1.2 结构断裂分析过程 …… 512
8.2 结构断裂分析实例详解——二维断裂问题 …… 515
8.2.1 问题描述 …… 515
8.2.2 问题分析 …… 516
8.2.3 求解步骤 …… 516
8.2.4 命令流 …… 524
8.3 结构断裂分析实例详解——具有中心裂纹的板状试样三维断裂分析 …… 526
8.3.1 问题描述 …… 526
8.3.2 问题分析 …… 526
8.3.3 求解步骤 …… 526
8.3.4 命令流 …… 543

第1章 概 述



本章导读：

本章主要介绍 ANSYS 16.1 软件的组成、特点及功能，并介绍 ANSYS 16.1 的启动过程及用户界面，同时还向读者介绍运用 ANSYS 16.1 进行结构分析的思路和基本步骤。

1.1 ANSYS 16.1 简介

ANSYS 是集结构力学分析、热力学分析、流体力学分析、电磁学分析、声学分析于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛应用于核工业、交通运输、石油化工、航空航天、机械制造、能源、电子、造船、汽车、国防军工、土木工程、生物医学、轻工、地矿、水利、家用电器等一般工业技术及科学研究。该软件可在大多数计算机及操作系统上运行，从 PC 到工作站直至巨型计算机，ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容；该软件基于 Motif 的菜单系统，使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择，此举大大方便了用户操作。它由目前世界上著名的有限元分析软件公司的美国 ANSYS 公司开发，是世界范围内发展最快的计算机辅助工程（CAE）软件之一，能与多数计算机辅助设计（CAD，Computer Aided Design）软件接口，实现数据的共享和交换，如 Creo、Nastran、Algor、I-DEAS、AutoCAD等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 功能强大，操作简单方便，现在已成为国际流行的有限元分析软件，在历年的 FEA 评比中都名列第一。目前，中国有 100 多所理工院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

1.1.1 ANSYS 16.1 发展过程

ANSYS 公司是由美国匹兹堡大学的 John Swanson 博士于 1970 年创建的，其总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡，是目前世界上 CAE 行业规模最大的公司。该公司主要致力于工程仿真软件和技术的研发，被全球众多行业中的工程师和设计师广泛采用。ANSYS 公司重点提供开放、灵活并对设计直接进行仿真的解决方案，提供从概念设计到最终测试产品研发全过程的统一平台，同时追求快速、高效和成本意识的产品开发。ANSYS 公司和其全球网络的渠道合作伙伴为客户提供销售、培训和技术支持一体化服务。目前，ANSYS 公司在全球有 1700 多名员工，在 40 多个国家销售产品。40 多年来，ANSYS 公司一直致力

于设计分析软件的开发，不断吸取和挖掘新的计算方法和计算技术，领导着世界有限元技术的发展。

ANSYS 公司于 2006 年收购了在流体仿真领域处于领先地位的 Fluent 公司，于 2008 年收购了在电路和电磁仿真领域处于领先地位的 Ansoft 公司。通过整合，ANSYS 公司成为目前全球最大的仿真软件公司之一。ANSYS 整个产品线包括结构分析（ANSYS Mechanical）系列、流体动力学（ANSYS CFD（FLUENT/CFX））系列、电子设计（ANSYS ANSOFT）系列，以及 ANSYS Workbench 和EKM等。其产品广泛应用于航空、航天、电子、车辆、船舶、交通、通信、建筑、电子、医疗、国防、石油、化工等众多行业。

ANSYS 软件的最初版本与最新版本 ANSYS 16.1 相比有很大区别，最初版本仅仅提供了热分析和线性分析功能，是一个批处理程序，而且只能在大型计算机上使用。20 世纪 70 年代初，随着非线性、子结构以及更多的单元类型的加入，ANSYS 软件发生了很大的变化，新技术的融入进一步满足了用户的需求；20 世纪 70 年代末，交互方式的加入是该软件最为显著的变化，此举使得模型生成和结果评价大为简化。

1.1.2 ANSYS 16.1 技术特点

与其他有限元计算软件相比，ANSYS 具有以下技术特征：

- 能实现多场及多场耦合功能；
- 集前后处理、分析求解及多场分析于一体；
- 独一无二的优化功能，具有流场优化功能的 CFD 软件；
- 具有强大的非线性分析功能；
- 具备快速求解器；
- 最早采用并行计算技术的 FEA 软件；
- 支持从 PC、WS 到巨型机的所有硬件平台；
- 从 PC、工作站、大型机直至巨型机的所有硬件平台上具有统一用户界面；
- 可与大多数的 CAD 软件集成；
- 可进行智能网格划分；
- 具有多层次多框架的产品系列；
- 具备良好的用户开发环境。

1.1.3 ANSYS 16.1 使用环境

ANSYS 是一个功能强大的有限元计算分析软件包。它可运行于 PC、Windows 工作站、UNIX 工作站以及巨型计算机等各类计算机及其操作系统中，其数据文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。该软件有多种版本，本书介绍版本为 ANSYS 16.1，其 PC 版本要求的操作系统为 Windows 7.0 及以上版本，也可运行于 UNIX 系统。PC 版的基本硬件要求为：显示分辨率为 1024×768 像素，显示内存为 20MB 以上，硬盘空间大于 20GB，推荐使用 17in 显示器。

ANSYS 多物理场耦合的功能，允许在同一模型上进行各种耦合计算，如热-结构耦合、热-电耦合、磁-结构耦合以及热-电-磁-流体耦合，同时在 PC 上生成的模型可运行于工作站及巨型计算机上，所有这一切保证了 ANSYS 用户对多领域工程问题的求解。

ANSYS 可与多种先进的 CAD 软件（如 AutoCAD、Creo、Nastran、Algor、I-DEAS 等）共享数据，利用 ANSYS 的数据接口，可以精确地将在 CAD 系统下生成的几何模型数据传输到 ANSYS，并通过必要的修补可准确地在该模型上划分网格并进行求解，这样就可以节省用户在创建模型的过程中所花费的大量时间，使用户的工作效率大幅度提高。

1.1.4 ANSYS 16.1 程序功能

ANSYS 软件主要包括三个部分：前处理模块、求解模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；求解模块包括结构分析（结构线性分析、结构非线性分析和结构高度非线性分析）、热分析、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流显示、立体切片显示、透明及半透明显示等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。ANSYS 软件提供了 160 种以上的单元类型，用来模拟实际工程中的各种结构和材料。

启动 ANSYS，进入 ANSYS 图形用户界面。从开始平台（主菜单）可以进入各处理模块：PREP7（通用前处理模块）、SOLUTION（求解模块）、POST1（通用后处理模块）、POST26（时间历程后处理模块）。

1．前处理模块 PREP7

ANSYS 前处理模块的作用主要包括：参数定义和建立有限元模型。

（1）参数定义

在使用 ANSYS 软件建立有限元模型的过程中，首先需要进行相关参数定义，主要包括定义单位制、定义单元类型、定义单元实常数、定义材料模型和材料特性参数，以及定义几何参数等。

在定义单位制时应注意，除磁场分析之外，ANSYS 软件可以使用任意一种单位制，但一定要保证单位制的统一。

在建立有限元模型或对实体模型进行网格划分之前，必须定义相应的单元类型，而单元实常数的确定也依赖于单元类型的特性。

材料模型和材料特性参数是表征实际工程问题所涉及材料的具体特性，因此材料模型的正确选择和材料参数的精确输入是实际工程问题得到正确解答的关键。

（2）建立有限元模型

ANSYS 软件提供了 4 种建立有限元模型的方法：直接建模、实体建模、输入在计算机辅助设计系统（CAD）中创建的实体模型、输入在计算机辅助设计系统（CAD）中创建的有限元模型，具体内容将在第 2 章介绍。

2．求解模块 SOLUTION

求解模块的作用是 ANSYS 软件用于对所建立的有限元模型进行力学分析和有限元求解，在该模块中，用户可以定义分析类型和分析选项、施加载荷及载荷步选项。

（1）定义分析类型和分析选项

用户需要根据所施加的载荷条件和所要计算的响应选择分析类型。ANSYS 软件提供的分

析类型为：静态（稳态）分析、瞬态分析、模态分析、谐波分析、谱分析、挠度和子结构。

分析类型定义完成之后，用户可根据分析类型定义分析选项。

（2）载荷

在 ANSYS 中，载荷包括边界条件和外部或内部作用力函数，在不同的分析领域中有不同的表征，但基本上可以分为 6 大类：自由度约束、力（集中载荷）、面载荷、体载荷、惯性载荷以及耦合场载荷。

- 自由度约束（DOF Constraints）：将给定的自由度用已知量表示。例如，在结构分析中，约束是指位移和对称边界条件，而在热力学分析中，则指的是温度和热通量平行的边界条件。
- 力（集中载荷）（Force）：是指施加于模型节点上的集中载荷或者施加于实体模型边界上的载荷。例如，结构分析中的力和力矩、热力分析中的热流速度、磁场分析中的电流等。
- 面载荷（Surface Load）：是指施加于某个面上的分布载荷。例如，结构分析中的压力、热力学分析中的对流和热通量等。
- 体载荷（Body Load）：是指体积或场载荷。例如，结构分析中的重力、热力分析中的热生成速度等。
- 惯性载荷（Inertia Loads）：是指由物体的惯性引起的载荷。例如，重力加速度、角速度、角加速度引起的惯性力。
- 耦合场载荷（Coupled-field Loads）：是一种特殊的载荷，是考虑到一种分析的结果，并将该结果作为另外一个分析的载荷。例如，将磁场分析中计算得到的磁力作为结构分析中的力载荷。

（3）指定载荷步

载荷步选项是用于更改载荷步的选项，如子步数、载荷步的结束时间和输出控制等。

（4）求解子模块

ANSYS 软件的求解模块包含以下子模块：

- 结构静力分析

用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 软件中的静力分析不仅可以进行线性分析，也可以进行非线性分析，如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

- 结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同，动力分析要考虑随时间变化的载荷以及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括：瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

- 结构非线性分析

结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 软件可求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和状态非线性三种。

- 动力学分析

ANSYS 软件可以分析大型三维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性，并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

● 热分析

程序可处理热传递的三种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的相变分析能力以及模拟热与结构应力之间的热-结构耦合分析能力。

● 电磁场分析

主要用于电磁场问题的分析，如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。还可用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

● 流体动力学分析

ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析，分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率。并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外，还可以使用三维表面效应单元和热-流管单元模拟包括对流换热效应结构的流体绕流过程。

● 声场分析

程序的声学功能用来研究在含有流体的介质中声波的传播，或分析浸在流体中的固体结构的动态特性。这些功能可用来确定音响话筒的频率响应，研究音乐厅的声场强度分布，或预测水对振动船体的阻尼效应。

● 压电分析

用于分析二维或三维结构对 AC（交流）、DC（直流）或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析类型可用于换热器、振荡器、谐振器、麦克风等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。可进行 4 种类型的分析：静态分析、模态分析、谐波响应分析、瞬态响应分析。

3．后处理模块 POST1 和 POST26

当 ANSYS 完成计算之后，可以通过后处理器观察结果。ANSYS 软件的后处理包括两个部分：通用后处理模块（POST1）和时间历程后处理模块（POST26）。

（1）通用后处理模块 POST1

通用后处理器也简称为 POSTl，用于分析处理整个模型在某个载荷步的某个子步、某个结果序列，或者某特定时间或频率下的结果，如结构静力求解中载荷步 5 的最后一个子步的压力，或者瞬态动力学求解中时间等于 10s 时的位移、速度与加速度等。运用该模块可以获得各种应力场、应变场及温度场的等值线图形显示、变形形状显示以及检查和解释分析的结果列表。POST1 也提供了很多其他的功能，如误差估计、载荷工况组合、结果数据的计算和路径操作等。通过单击主菜单中的 General Postproc 可以直接进入到通用后处理模块。

（2）时间历程响应后处理模块 POST26

时间历程后处理器也简称为 POST26，用于分析处理指定时间范围内模型指定节点上的某结果项随时间或频率的变化情况，如在瞬态动力学分析中，结构某节点上的位移、速度和加速度 0～10s 的变化规律，绘制位移-时间曲线、应力-应变曲线等。另外，POST26 还具有以下功能：可以进行曲线的代数运算，变量之间可以进行加、减、乘、除运算以产生新的曲线；也可以取绝对值、平方根、对数、指数，以及最大值和最小值等；还可以对曲线进行微积分运算；还能够从时间历程结果中生成谱响应。通过单击主菜单中的 TimeHist Postpro 可

以直接进入到时间历程响应后处理模块。

后处理器可以处理的数据类型有两种：一是基本数据，是指每个节点求解所得到的自由度解，对于结构分析为位移张量，其他类型求解还包括热分析的温度、磁场分析的磁势等，这些结果项统称为节点解；二是派生数据，是指根据基本数据导出的结果数据，通常是计算每个单元的所有节点、所有积分点或质心上的派生数据，也称为单元解。不同分析类型有不同的单元解，对于结构分析有应力和应变等，其他如热分析的热梯度和热流量、磁场分析的磁通量等。

1.1.5 ANSYS 16.1 创新之处

1．新功能

作为一个大型 CAE 分析软件，ANSYS 自 20 世纪 70 年代诞生以来，随着计算机和有限元理论的发展，在各个领域得到了广泛应用和高度评价。伴随着版本的更新，分析能力和各项操作功能都得到了改善和发展。ANSYS 16.1 不仅在计算速度上进行了改进，同时增强了软件的几何处理、网格划分和后处理等能力。另外，它还将创新的仿真技术引入各主要物理学科。这些改进代表了仿真驱动产品的发展又前进了一大步。

目前，ANSYS 16.1 版本可以提供一个整体的仿真环境来实现完备的虚拟仿真。

ANSYS 为每个学科提供市场领先的、具备功能深度和广度的解决方案，同时可实现跨学科的集成仿真，可以将机械、流体、热、电磁等的仿真结果嵌入到系统中进行整个系统的虚拟原型的设计。

在电子设计与仿真方面：ANSYS 16.1 改进的 HPC 和 FA-DDM 变得更高效、更智能。其速度和内存效率都得到了显著提升，并且可以自动优化计算资源，支持多层并行操作。在 ANSYS 16.1 中，测试一个 80×80 Vivaldi 阵列天线仿真，其中有超过 1 亿的未知量和 1900 万网格，可以在 1.5h 内结束测试，速度提升 2.2 倍，内存消耗减少 90%以上，消耗不到 1%，提升幅度非常大。

另外，ANSYS 16.1 还提供了各种各样的设计平台，能够帮助用户更快速地解决工程实际问题。

在电磁兼容设计平台中，可以将原来电机的 Map 图仿真时间由 10 天缩短到只用 1 天时间，而且实际操作只需要 30min 左右就可以完成。

在 RedHawk 芯片设计（芯片/封装性能和功耗 ）方面：随着现代技术的发展，芯片的规模越来越大，一般典型的问题经常都是 40 亿以上未知量来进行仿真，并且有通信、待机、视频等数百种工作模式。ANSYS 16.1 能够帮助用户准确地预测出芯片设计的问题，并且能够优化设计，最终实现整个的芯片性能稳健设计，从而适应所有的工作模式并符合生产要求。

同时，RedHawk-DMP 还具有并行计算功能，速度更快，计算量更大。可以支持分布式多节点并行计算（2～16 台计算机），将计算效率提高 3～5 倍。对于手机芯片，原来需要 28h，现在只需要 5h。对于苹果、英特尔芯片仿真，都可以非常快速地完成。

在流体仿真方面，ANSYS 拥有了更快的速度，特别是工程计算方面，大大缩短实际的工程计算时间。ANSYS 16.1 和 15.0 相比，整个仿真的各个流程阶段，时间都显著缩短，总耗时减少 40%以上。具体表现在以下几个方面：

1）网格划分速度提升。网格划分速度提高了 5～10 倍。原来做网格划分需要几天时间，而现在可以在 24h 内完成。

2）求解速度提高。涡轮机械的流体仿真求解速度提高了 30%～40%。

3）最大程度地实现了高性能计算。在同类产品里，其他软件最多只能支持 200 个 CPU 核的计算，而 ANSYS 16.1 则极大地超越了这个数量级，因此，对于整个工程仿真的时效率都有极大程度的提升。

流体仿真-化学物质的反应：拥有化学反应模型以及燃烧模型，通过这个工具可以对化学反应（如内燃机的排放）等方面进行模拟仿真，并且整体的仿真速度快，使用方便，内存消耗少，能够得到非常准确的、符合工程实践的结果。

流体仿真-形状优化与伴随求导：形状优化可以实现不同的工况，特别是流体局部的变化情况下的仿真，如赛车在赛道上运动的时候，有直行、转弯等不同的工况。现在新的 ANSYS 16.1 版本可以更方便、更直接地对这些工况进行优化，而且效率更高。

在结构仿真方面，ANSYS 16.1 也有非常多的改进：

1）新的网格剖分技术、稳健的壳单元和四面体网格；

2）基于四面体网格的复杂结构断裂仿真技术；

3）非线性接触仿真技术的显著改进；

4）非线性自适应网格自动化重构技术；

5）复合材料的高效率精确仿真技术；

6）PCB/封装的可靠性仿真技术；

7）多物理场的快速耦合仿真技术。

2．单元更新

ANSYS 16.1 不支持的单元见表 1-1。

表 1-1 ANSYS 16.1 不支持的单元

单 元 类 型	可替代的单元类型
BEAM4	BEAM188 [KEYOPT(3)=3]
SOLID5	SOLID226
INFIN9	INFIN110
CONTAC12	CONTA178 [UZ=0]
PLANE13	PLANE223
PPE16	PIPE288 [KEYOPT(3)=2]
PIPE18	ELBOW290
PLANE25	SOLID272 [KEYOPT(6)=0]
SHELL41	SHELL181 [KEYOPT(1)=1, KEYOPT(3)=2]
PLANE42	PLANE182 [KEYOPT(1)=3]
SOLID45	SOLID185 [KEYOPT(2)=3]
INFIN47	INFIN111

（续）

单 元 类 型	可替代的单元类型
CONTAC52	CONTA178
PLANE53	PLANE233
PIPE59	PIPE288 [KEYOPT(3)=2]
SHELL63	SHELL181 [KEYOPT(3)=2]
SOLID65	SOLID185 [KEYOPT(3)=0，且 KEYOPT(2)=0 – Full；或 KEYOPT(3)=0，且 KEYOPT(2)=3 – simplified]
FLUID79	FLUID29, FLUID30, FLUID220, FLUID221
FLUID80	FLUID29, FLUID30, FLUID220, FLUID221
FLUID81	FLUID29, FLUID30, FLUID220, FLUID221
PLAN82	PLANE183
PLAN83	SOLID273 [KEYOPT(6)=0]
SOLID92	SOLID187
SOLID95	SOLID186 [KEYOPT(2)=1 或 KEYOPT(2)=0]
SOLID98	SOLID227

注意：表 1.1 中第 1 列的单元还可以在 ANSYS 16.1 中使用，只不过 ANSYS 建议使用其替代单元。

3．命令（Commands）更新

以下命令在 ANSYS 16.1 中已经不再支持：

BELLOW, NLOC, LENG, STIFF, FLEX, ELEM
BEND, NEL1, NEL2, RAD, NDIV, ESTRT, EINC
BRANCH, NODE, X, Y, Z
FLANGE, NLOC, LENG, MASS, SIF, FLEX, ARINS, ELEM
MITER, NEL1, NEL2, RAD, NDIV, ESTRT, EINC
PCORRO, CTK
PDRAG, PX1, PY1, PZ1, H1, PX2, PY2, PZ2, H2, Kcord
PFLUID, DENS
PGAP, NLOC, K, DX, DY, DZ, GAP, ELEM
PINSUL, DENS, ITK
PIPE
POPT, Lop1
PPRES, PRESS
PSOLVE, Lab, Rkey
PSPRNG, NLOC, TYPE, K, DX, DY, DZ, ELEM
PTEMP, TOUT, TIN
PUNIT, KOPT
REDUCE, NLOC, LENG, ELEM
RUN, DX, DY, DZ, NDIV, NEND, ESTRT, EINC
SSTIF, Key
TEE, NCENT, TYPE, ELEM, EINC, L1, L2, L3
VALVE, NLOC, LENG, MASS, SIF, FLEX, ARINS, ELEM

1.1.6 ANSYS 16.1 文件系统

ANSYS 文件名形式为 Jobname.Ext，包括工作名和扩展名两部分。ANSYS 文件的工作名一般由用户定义，用于标识不同个体的差异，而扩展名由 ANSYS 软件定义，用于标识 ANSYS 文件的不同类型。典型的 ANSYS 文件如下。

- 日志文件（Jobname.LOG）：当进入 ANSYS 时系统会打开日志文件。在 ANSYS 中输入的每个命令或在 GUI（图形用户界面）方式下执行的每个操作都会被复制到日志文件中，当退出 ANSYS 时系统会关闭该文件。使用/INPUT 命令读取日志文件可以对崩溃的系统或严重的用户错误进行恢复。
- 数据库文件（Jobname.DB）：数据库文件是 ANSYS 软件中最重要的文件之一，它包含了所有的输入数据（单元、节点信息、初始条件、边界条件、载荷信息）和部分结果数据（通过 POST1 后处理器读取）。
- 错误文件（Jobname.ERR）：错误文件用于记录 ANSYS 发出的每个错误或警告信息。如果 Jobname.ERR 文件在启动 ANSYS 之前已经存在，那么所有新的警告和错误信息都将追加到这个文件的后面。
- 输出文件（Jobname.OUT）：输出文件会将 ANSYS 给出的响应捕获至用户执行的每个命令，而且还会记录警告、错误消息和一些结果。
- 结果文件（Jobname.RST、Jobname.RTH、Jobname.RMG）：存储 ANSYS 计算结果的文件。其中，Jobname.RST 为结构分析结果文件；Jobname.RTH 为热分析结果文件；Jobname.RMG 为电磁分析结果文件。

1.2 ANSYS 16.1 基本操作

1.2.1 ANSYS 16.1 启动与设置

ANSYS 16.1 启动路径为：【开始】→【程序】→ANSYS 16.1→Mechanical APDL Product Launcher，启动后出现 16.1：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口，如图 1-1 所示。

1．选择 ANSYS 产品

用户可根据使用要求在 Simulation Environment 下拉选框中选择模拟环境，一般选择 ANSYS；在 License 下拉选框中选择 ANSYS 产品，一般选择 ANSYS Multiphysics 或 ANSYS LS/DYNA。

2．选择工作目录、设置工作文件名

在 Working Directory 输入栏中输入工作目录，也可通过单击 Browse 按钮进行选择，此目录一旦选定，ANSYS 所有生成文件都将自动写在此目录下；在 Job Name 一栏中输入工作文件名，也可通过单击 Browse 按钮选择工作文件名，ANSYS 默认工作文件名为 file。

3．设置 ANSYS 工作空间和数据库的大小

单击 Customization/Preferences 按钮，在 Memory 下拉选框中设置 ANSYS 工作空间和数据库的大小。在 Graphics Device Name 下拉选框中设置图形设备驱动，ANSYS 软件提供了

三种图形设备驱动，分别为 Win32、Win32c 和 3D 选项。Win32 选项适用于大多数的图形显示，在后处理过程中可以提供 9 种颜色的等值线；Win32c 选项能提供 128 种颜色的区别；3D 选项对三维图形的显示具有良好的效果，如果计算机配置了 3D 卡，应选择 3D 选项。

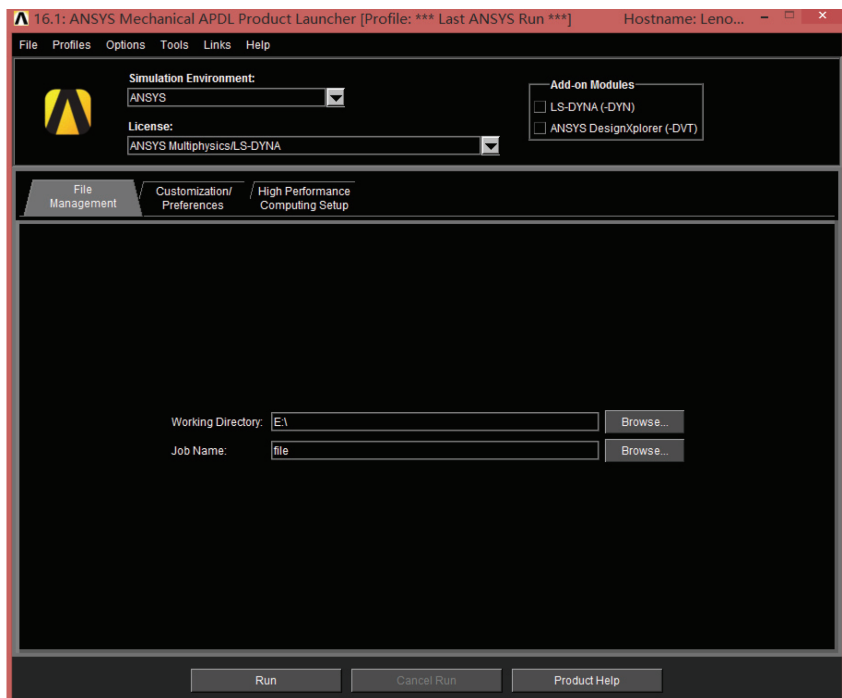


图 1-1　16.1：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher

4．运行 ANSYS

当以上各种参数设置完毕，就可以单击 Run 按钮运行 ANSYS。

提示：设置完成并运行 ANSYS 之后可关闭 16.1：ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 窗口。

1.2.2 ANSYS 16.1 用户界面

启动 ANSYS 后，其图形用户界面如图 1-2 所示。

1．应用菜单（Utility Menu）

包含文件管理、选择、列表显示、显示控制、参数设置、宏设置及帮助查询等功能。该菜单为下拉式结构，可直接完成某一功能或弹出对话窗口。

2．主菜单（Main Menu）

包含前处理、求解、后处理、优化设计等 ANSYS 的主要功能。

3．输入窗口（Input）

该窗口为 ANSYS 命令的输入区域，可以显示程序的提示信息和浏览已经输入的命令，所有输入的命令将在此窗口显示。

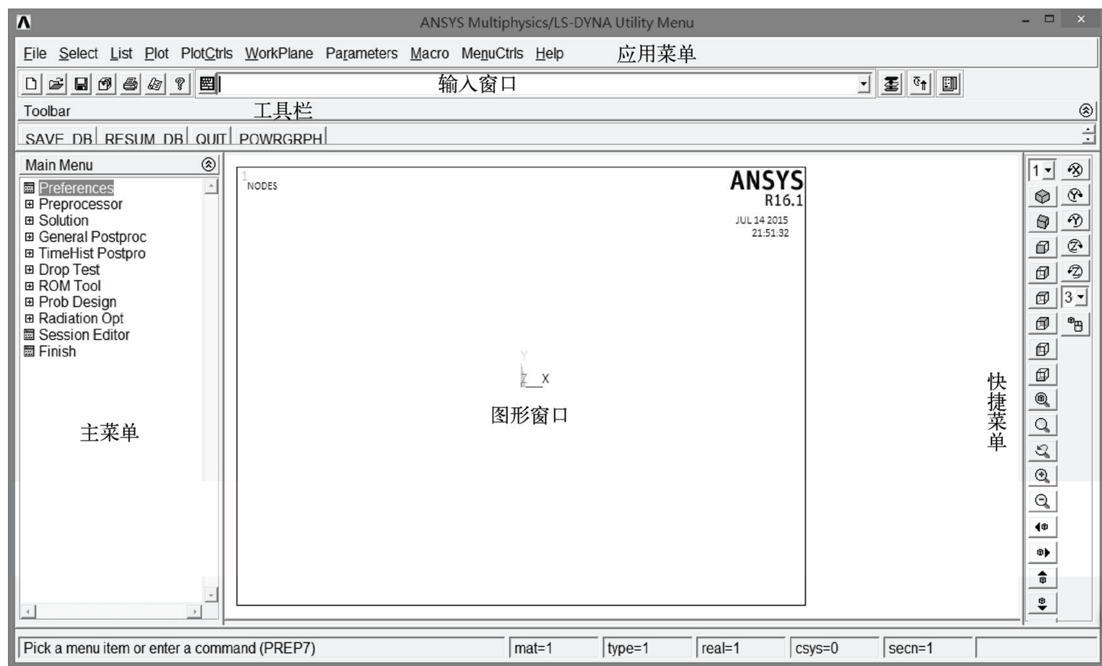


图 1-2 ANSYS 16.1 图形用户界面

4．工具栏（Toolbar）

包含存储、读取数据文件、关闭 ANSYS 等功能。

5．图形窗口（Graphic Window）

该窗口显示由 ANSYS 创建或传递到 ANSYS 的模型及分析结果等图形。

6．快捷菜单（Shortcut Menu）

包含窗口选择、视图显示选择，以及图形放大、缩小、旋转、平移等常用功能，为用户提供了快捷的操作方式，方便用户使用。

图 1-3 所示为 ANSYS 的信息输出窗口（Output Window），该窗口显示用户对 ANSYS 的操作信息，包括操作过程信息、计算过程信息、错误提示信息等，该窗口通常在其他窗口之后，需要查看时可单击使之成为当前窗口。

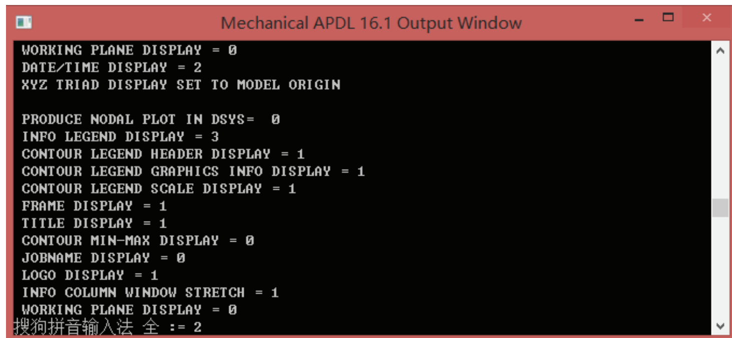


图 1-3 ANSYS 16.1 信息输出窗口



1.2.3 退出 ANSYS 16.1

在 ANSYS 应用菜单中选择 Utility Menu | File | Exit 命令，或单击工具栏中的 QUIT 按钮，将出现如图 1-4 所示的关闭 ANSYS 对话框，其中的 4 个单选按钮的功能如下。

- Save Geom＋Loads：退出 ANSYS 时保存几何模型、载荷及约束；
- Save Geo＋Ld＋Solu：退出 ANSYS 时保存几何模型、载荷、约束及求解结果；
- Save Everything：退出 ANSYS 时保存所做的修改；
- Quit−No Save：退出 ANSYS 时不保存所做的修改。

选择所需要的单选按钮，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

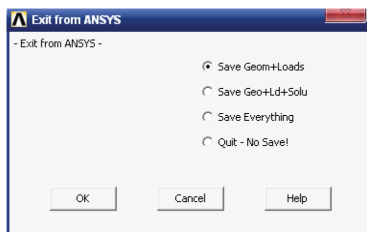


图 1-4　关闭 ANSYS 对话框

1.3　ANSYS 16.1 结构分析

1.3.1 ANSYS 16.1 结构分析介绍

结构分析是有限元分析方法比较常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；海洋工程结构，如船舶结构；航空结构，如飞机机身等；同时还包括机械零部件，如活塞，传动轴等。结构分析中计算得出的基本未知量（节点自由度）是位移，其他的一些未知量，如应变、应力和反作用力等，均可通过节点位移导出。

ANSYS 产品家族中有 7 种结构分析的类型。

- 静力分析：用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触和蠕变分析。
- 模态分析：用于计算结构的固有频率和模态。
- 谐波分析：用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。
- 瞬态动力学分析：用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可涉及上述提到的结构静力分析中所有的非线性性质。
- 谱分析：是模态分析的应用拓展，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变。
- 屈曲分析：用于计算屈曲载荷和确定屈曲模态。ANSYS 16.1 可进行线性（特征值）和非线性屈曲分析。
- 显式动力分析：ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

此外，前面提到的 7 种分析类型还有如下特殊的分析应用：

- 断裂力学
- 复合材料
- 疲劳分析

- p-Method

1.3.2 ANSYS 16.1 结构分析过程

典型的 ANSYS 16.1 结构分析过程包括以下三个步骤：

1）创建有限元模型。包括指定工作文件名和工作标题、创建或读入几何模型、定义单元类型、定义单元实常数、定义材料属性及有限元网格划分。

2）施加载荷进行求解。包括施加载荷、边界条件和进行求解计算。

3）查看求解结果。包括结果的观察、分析和检验。

下面对这三个分析步骤进行具体介绍。

1．建立有限元模型

（1）指定工作文件名和工作标题

该项工作并不是必须要求的，但是在对多个工程问题进行分析时推荐使用工作文件名和工作标题。

- 定义工作文件名

文件名是用来识别 ANSYS 作业的，通过为分析的工程指定文件名，可以确保文件不被覆盖。如果用户在分析开始没有定义工作文件名，则所有的文件名都被默认设置为 file。ANSYS 16.1 的工作文件名可以通过如下方式进行改写：

- ➢ 进入 ANSYS 16.1 时，通过入口选项进行修改，参阅 1.2.1 节。
- ➢ 进入 ANSYS 16.1 后，可以通过以下命令或菜单方式进行修改。

Command：/ FILNAM

GUI：Utility Menu | File | Change Jobname

- 定义工作标题

用下列命令或菜单方式定义工作标题：

Command：/ TITLE

GUI：Utility Menu | File | Change Title

（2）定义单元类型和单元关键字

ANSYS 16.1 提供了将近 200 种单元类型，每一种单元类型都有特定的编号和单元类型名，如 PLANE182、SOLID90、SHELL208 等；单元关键字定义了单元的不同特性，如轴对称、平面应力等，用户需根据需要选择相应的单元类型，并设置其关键字。

用下列命令或菜单方式定义单元类型：

Command：ET

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

用下列命令或菜单方式定义单元关键字：

Command：KEYOPT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

（3）定义单元实常数

实常数指某一单元的补充几何特性，如单元的厚度、梁的横截面积和惯性矩等，指定了单元类型之后，应根据单元类型指定相应的实常数。

用下列命令或菜单方式定义单元实常数：

Command：R

GUI：Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete

（4）定义材料属性

在所有的分析中都要输入材料属性，材料属性根据分析问题的物理环境不同而不同。例如，在结构分析中必须输入材料的弹性模量、泊松比；在热结构耦合分析中必须输入材料的导热系数、线膨胀系数；如果在分析过程中需要考虑重力、惯性力，则必须输入材料的密度。

用下列命令或菜单方式定义材料属性：

Command：MP、TB

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props

ANSYS 16.1 定义了 100 多种材料模型，用户只需要按照模型格式输入相关数据即可定义常用材料和某些特定材料的材料属性。除了磁场分析之外，在输入数据时用户不需要指定 ANSYS 所用的单位，但要注意所有输入量的单位必须保持统一。

（5）创建几何模型

ANSYS 16.1 提供了下列生成模型的方法：

- 用 ANSYS 16.1 直接创建实体模型。
- 输入在计算机辅助设计系统创建的模型。

采用实体建模有自底向上建模和自顶向下建模两种方法。所谓自底向上建模是指先定义关键点，然后利用关键点定义较高级的实体图元（即线、面和体）；而自顶向下建模是指生成体素，属于该体素的较低级图元会由 ANSYS 自动生成。在实体建模的过程中，这两种建模技术可以自由组合。

（6）进行有限元网格划分

有限元模型是将几何模型划分为有限个单元，单元间通过节点相连，在每个单元和节点上求解物理问题的近似解。网格划分方法参阅第 2 章相关内容。

2．加载求解

在有限元模型建立之后，可以运用 SOLUTION 处理器定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定载荷步长，进行求解。具体步骤如下：

（1）定义分析类型和分析选项

ANSYS 16.1 的分析类型包括：静态、瞬态、调谐、模态、谱分析、挠度和子结构分析等，用户可以根据需要解决的工程问题进行选择。

（2）加载

上文提过，ANSYS 的载荷分为 6 大类：位移载荷、力或力矩、面载荷、体积载荷、惯性载荷、耦合场载荷，这些载荷大部分可以施加到几何模型上，包括关键点、线和面；也可以施加到有限元模型上，包括单元和节点。

（3）指定载荷步选项

载荷步选项的功能是对载荷步进行修改和控制，包括对子步数、步长和输出控制等。

（4）求解初始化

其主要功能是在 ANSYS 软件数据库中获得模型和载荷信息，进行计算求解，并将结果数据写入到结果文件（Jobname.RST、Jobname.RTH、Jobname.RMG 或 Jobname.RFL）和数

据库中。

3．查看求解结果

程序计算完成之后，可以通过通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26 查看求解结果。POST1 用于查看整个模型或部分模型在某一时间步的计算结果，POST26 用于查看模型的特定点在所有时间步内的计算结果。



1.4 ANSYS 16.1 使用技巧

1.4.1 几何模型修正技巧——布尔操作

ANSYS 提供了一种复杂几何模型的操作方法——布尔操作，利用布尔操作可进行模型的相交、相加、相减、分割、粘合、叠合及分离，使得创建复杂模型的工作量大为降低。

1．布尔操作设置

在进行布尔操作之前，需进行总体设置，其命令流及 GUI（界面操作）操作如下：

Command：BOPTN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Settings

执行上述的 GUI 操作后，出现 Boolean Operation Settings 对话框，如图 1-5 所示，其中 KEEP Keep input entities？的默认选项为 No，表示在进行布尔操作之后，初始实体都将被删除；当用户将该选项定义为 Yes 时，则程序在进行布尔操作之后，将保留初始实体。例如，两条线段在进行相加操作之后，默认情况下将得到 1 条线段，但如果将 KEEP Keep input entities？选项设置为 Yes，则将得到 3 条线段，其中包含 2 条初始线段和 1 条生成线段。NWARN If operation has no effect 的默认选项为 Give warning msg，表示在进行布尔操作时，如果由于误操作等原因没有响应，则程序给出警告信息；当用户将该选项设置为 No messages 时，则程序此时不会给出警告及提示信息；当用户将该选项设置为 Give error msg 时，则程序此时将给出错误提示。该对话框中的其余选项一般采用默认值。

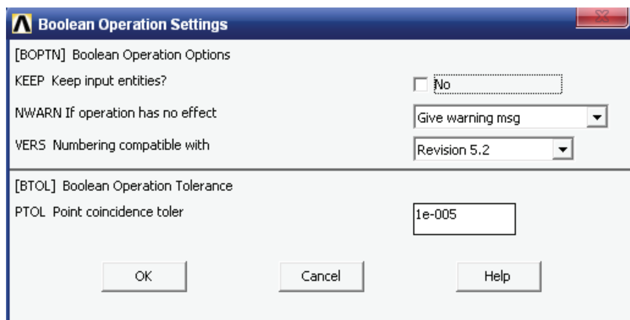


图 1-5 布尔操作设置对话框

注意：上述是布尔操作的总体设置，在具体的布尔操作的设置为默认选项时起作用；但当用户对布尔操作的选项进行了设置，即不再是默认值时，要以当前布尔操作的设置为准。

提示：布尔操作之后生成新实体的编号一般从现有同类型实体编号的基础上加 1 开始，如现有 5 条线段、1 个面，则经布尔操作之后生成新的线段的编号从 6 开始，面编号从 2 开始。

技巧：可通过执行 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框后，将相应的实体编号显示选项从 Off 状态激活为 On 状态来显示实体的编号，如图 1-6 所示。

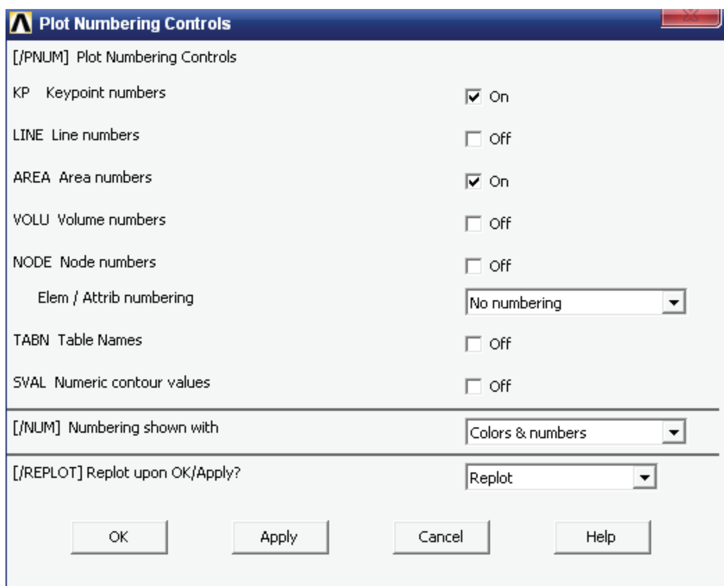


图 1-6　编号显示控制对话框

技巧：对于关键点、线段及面，通过执行上述命令后，其编号可以在 ANSYS 显示窗口直接观察到，但对于体而言，其编号一般不易直接观察到，此时可通过执行 Utility Menu | List | Volume 命令来显示其详细信息。

2．相交操作

相交操作的含义是将两个或多个实体相交后取其交点、交线、交面及重合部分的实体，剩余的实体则在此操作之后被删除。它包括普通相交（Common intersect）和对交（Pairwise intersect）两种情况，二者的主要区别体现在多个实体（3 个或 3 个以上）相交操作上，普通相交操作在多个实体相交时取其公共区域，而对交操作在多个实体相交时取每两个实体相交的公共区域。另外，普通相交操作可以在不同类型实体之间进行，如线与面、线与体、面与体的相交，而对交操作只限于同类实体之间。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）线与线相交

线段普通相交：

Command：LINL

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Common | Lines

多条线段对交：

Command：LINP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Pairwise | Lines

图 1-7 是线段普通相交后的结果，图 1-8 是 3 条线段对交后的结果。

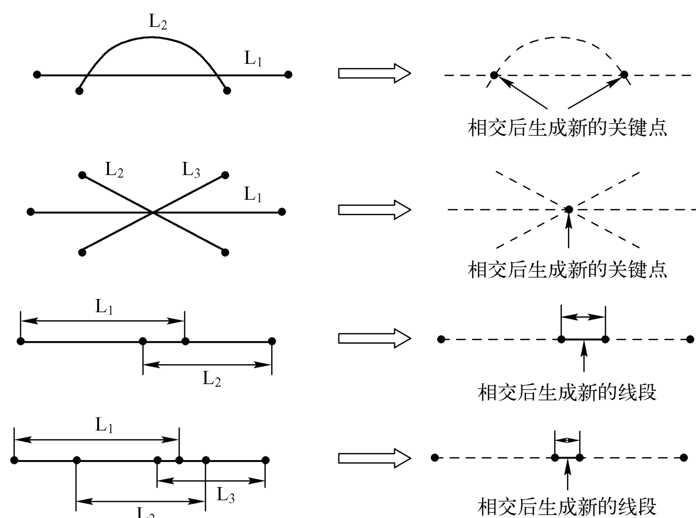


图 1-7　线段普通相交

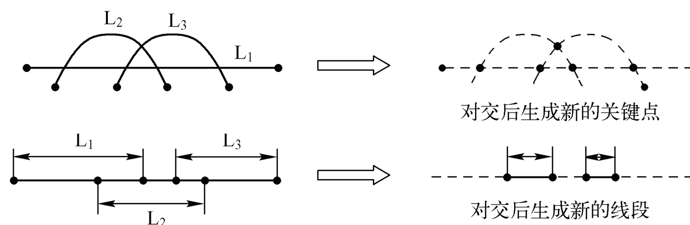


图 1-8　3 条线段对交

（2）面与面相交

面的普通相交：

Command：AINA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Common | Areas

多个面对交：

Command：AINP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Pairwise | Areas

图 1-9 是面普通相交后的结果，图 1-10 是 3 个面对交后的结果。

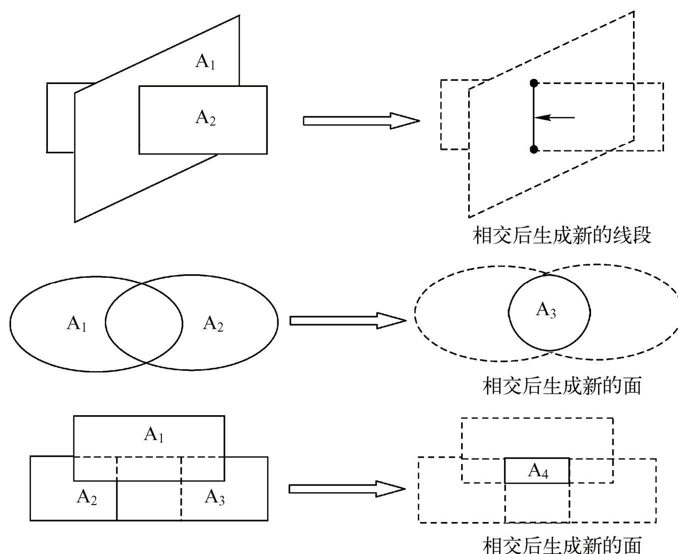


图 1-9　面普通相交

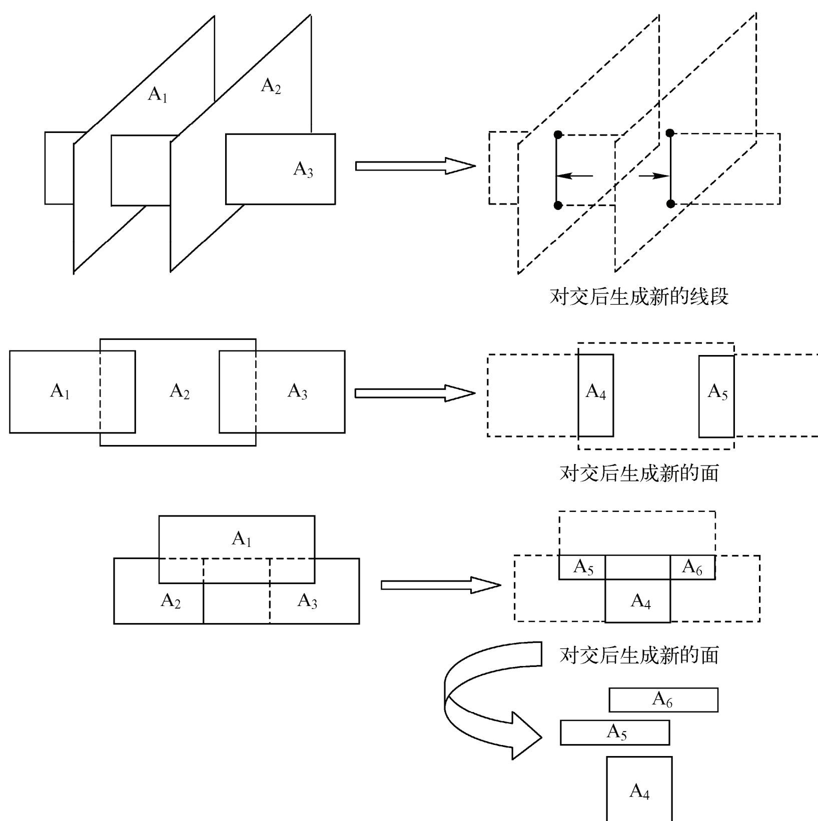


图 1-10　3 个面对交

（3）体与体相交

体的普通相交：

Command：VINV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Common | Volumes

多个体对交：

Command：VINP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Pairwise | Volumes

图 1-11 是体普通相交后的结果，图 1-12 是 3 个体对交后的结果。

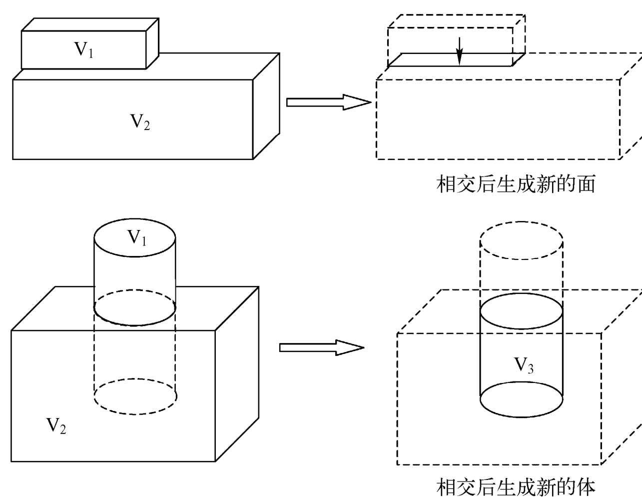


图 1-11 体普通相交

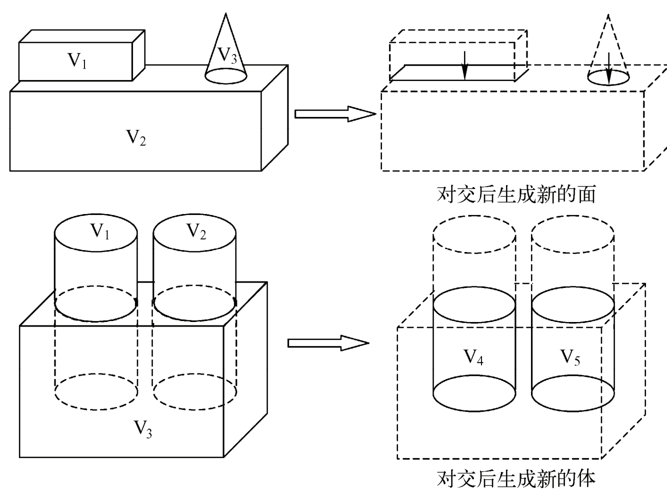


图 1-12 3 个体对交

（4）线与面相交

Command：LINA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Line with Area

图 1-13 是线与面相交后的结果。

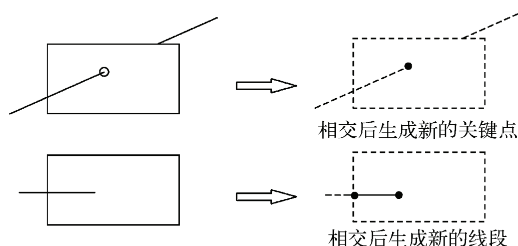


图 1-13　线与面相交

注意：ANSYS 只允许 1 条线段与 1 个面相交。

（5）面与体相交

Command：AINV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Area with Volume

图 1-14 是面与体相交后的结果。

注意：ANSYS 只允许 1 个面与 1 个体相交。

（6）线与体相交

Command：LINV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Intersect | Line with Volume

图 1-15 是线与体相交后的结果。

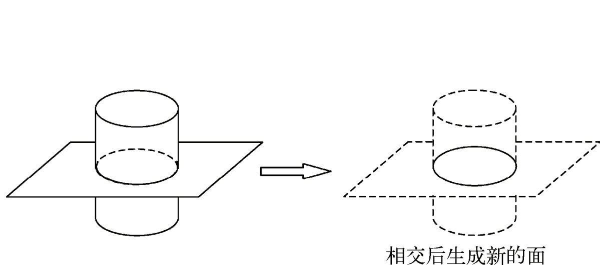


图 1-14　面与体相交

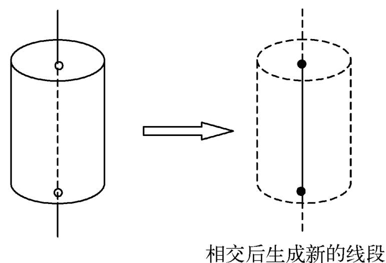


图 1-15　线与体相交

注意：ANSYS 只允许 1 条线段与 1 个体相交。

3．相加操作

相加操作的含义是将两个或多个实体合并后生成 1 个新的实体，包括线线相加、面面相

加与体体相加。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）线与线相加

Command：LCOMB

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

图 1-16 是线段相加后的结果。

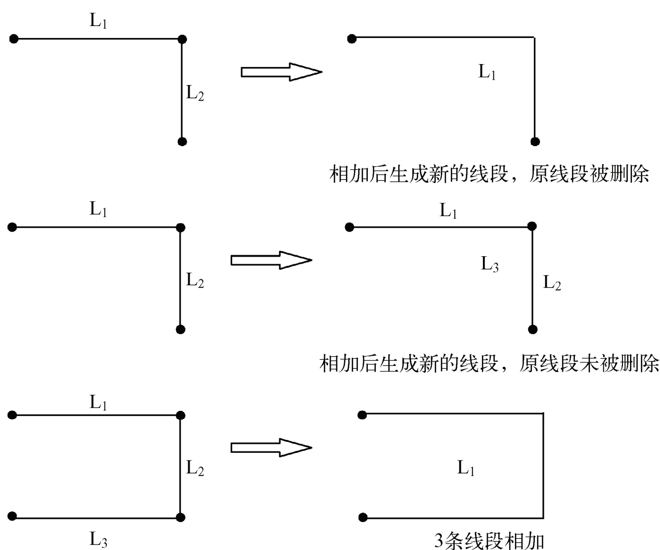


图 1-16　线段相加

注意：执行该操作的线段必须具有共同的端点。线段与线段相加会出现上述两种结果，即相加后生成 1 条新的线段，原有的线段被删除（若该线段附属于某个面，则不能被删除），或相加后生成 1 条新的线段，同时保留原有的线段，程序默认为第 1 种情况。

提示：若执行线段相加操作之后，原线段被删除，则新生成的线段的编号为原线段中的最小编号。

（2）面与面相加

Command：AADD

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Areas

图 1-17 是面相加后的结果。

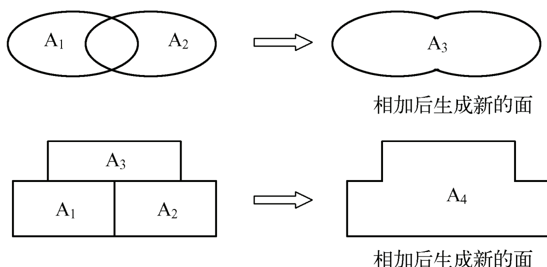


图 1-17　面相加

（3）体与体相加

Command：VADD

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes

图 1-18 是体相加后的结果。

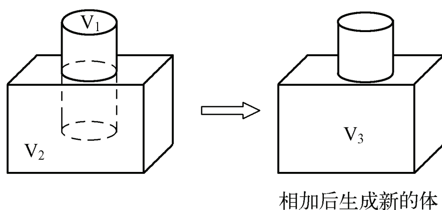


图 1-18　体相加

4．相减操作

相减操作的含义是从 1 个实体上删除和另外 1 个实体重合的部分后生成 1 个或多个新的实体，包括线线相减、面面相减与体体相减。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）线与线相减

Command：LSBL

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | With Options | Lines

图 1-19 是两条线段相减（L_1-L_2）后的结果，图 1-20 是 3 条线段相减（L_1+L_2-L_3）后的结果。

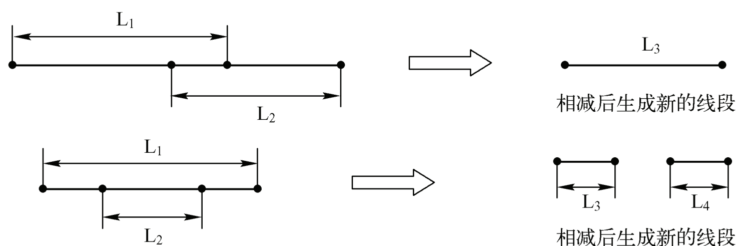


图 1-19　两条线段相减

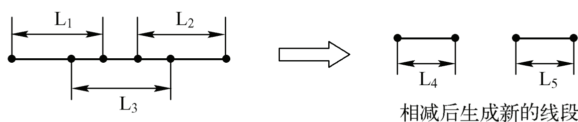


图 1-20　3 条线段相减

（2）面与面相减

Command：ASBA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜With Options｜Areas

图 1-21 是两个面相减（A_1-A_2）后的结果，图 1-22 是 3 个面相减（$A_1+A_2-A_3$）后的结果。

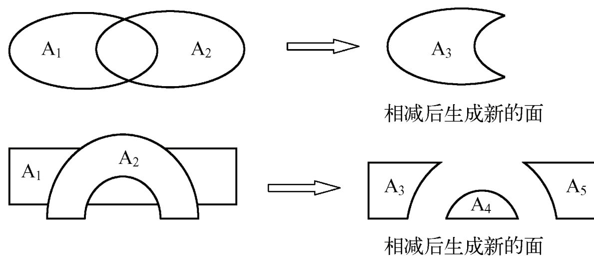


图 1-21 两个面相减

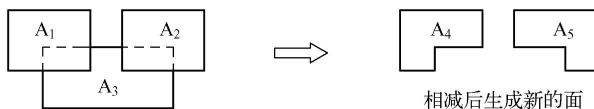


图 1-22 3 个面相减

（3）体与体相减

Command：VSBV

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜Volumes

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜With Options｜Volumes

图 1-23 是体相减后的结果。

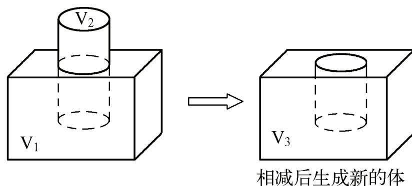


图 1-23 体相减

5．分割操作

分割操作的含义是用 1 个实体将另外 1 个实体分割后生成 2 个或多个新的实体，包括用线分割线、用线分割面、用面分割线、用面分割面、用面分割体、用体分割线、用体分割面、用工作平面分割线、用工作平面分割面、用工作平面分割体、将线段分割为 *n* 份。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）用线分割线

Command：LSBL

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜Line by Line

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜With Options｜Line by Line

图 1-24 是用线分割线（L_1-L_2）后的结果，图 1-25 是用线分割两条线［（L_1&L_2）$-L_3$）］后的结果。

（2）用线分割面

Command：ASBL

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜Area by Line

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜With Options｜Area by Line

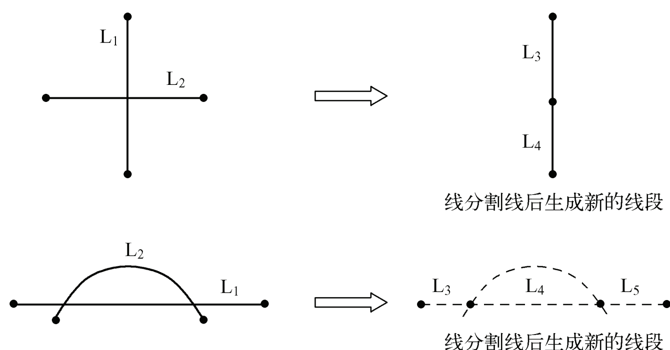


图 1-24　用 1 条线分割 1 条线

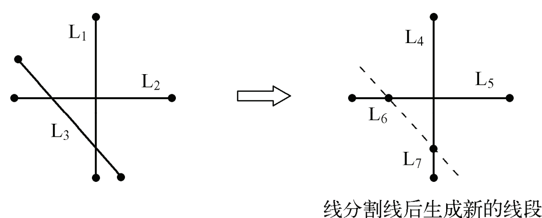


图 1-25　用 1 条线分割两条线

图 1-26 是用线分割面后的结果。

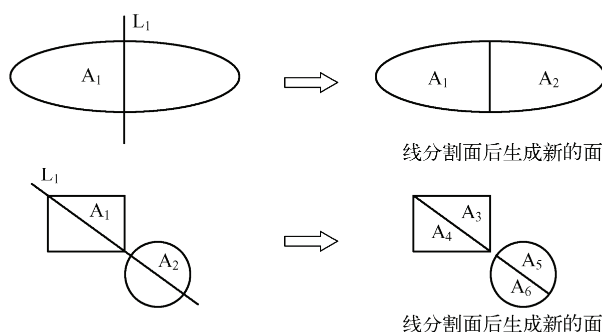


图 1-26　用线分割面

（3）用面分割线

Command：LSBA

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜Line by Area

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜With Options｜Line by Area

图 1-27 是用面分割线后的结果。

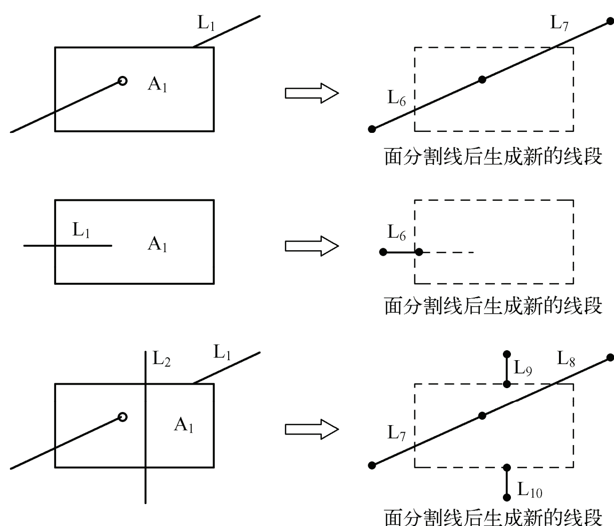


图 1-27 用面分割线

提示：由于进行布尔操作之前存在 5 条线段（线段 L_1 和面 A_1 上的 4 条线段），因此经布尔操作之后生成新的线段的编号从 L_6 开始。

（4）用面分割面

Command：ASBA

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜Area by Area

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜With Options｜Area by Area

图 1-28 是用面分割面（A_1-A_2）后的结果。

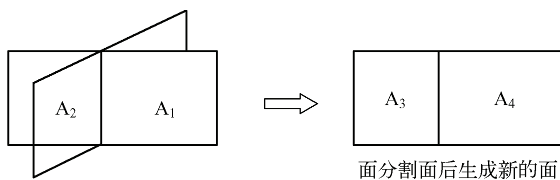


图 1-28 用面分割面

（5）用面分割体

Command：VSBA

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜Volume by Area

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Devide｜With Options｜Volume by Area

图 1-29 是用面分割体后的结果。

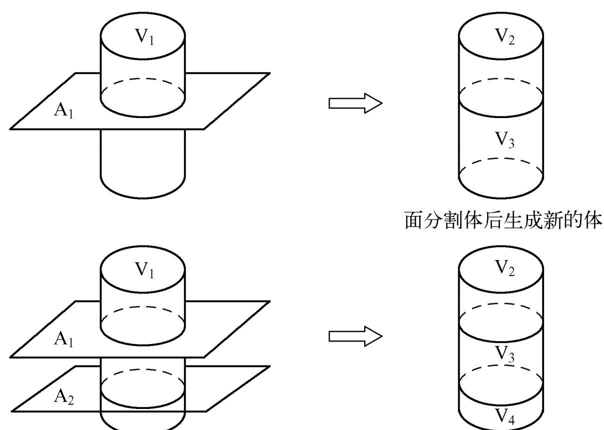


图 1-29　用面分割体

（6）用体分割线

Command：LSBV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | Line by Volume

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | With Options | Line by Volume

图 1-30 是用体分割线后的结果。

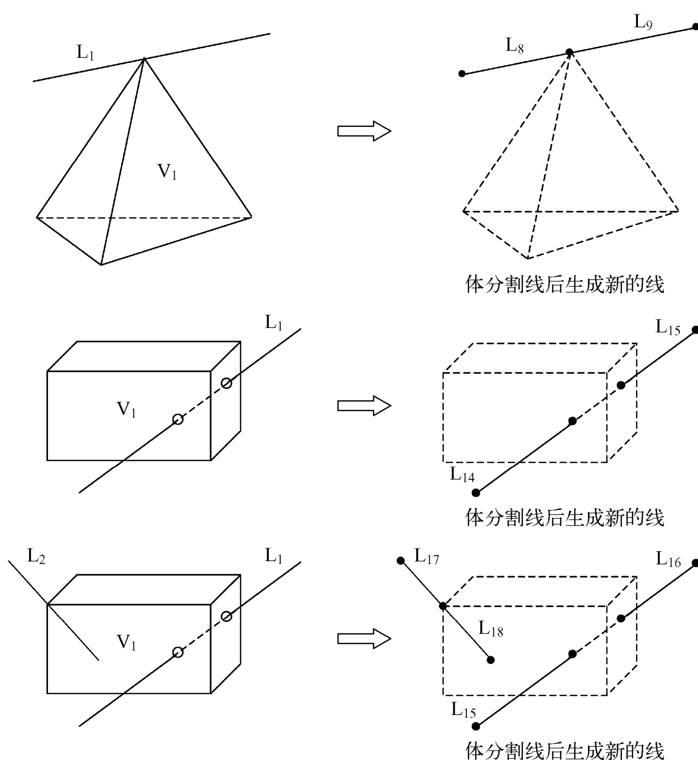


图 1-30　用体分割线

注意：线段 L_2 和体 V_1 的前端面不在同一个平面内。

（7）用体分割面

Command：ASBV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | Area by Volume

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | With Options | Area by Volume

图 1-31 是用体分割面后的结果。

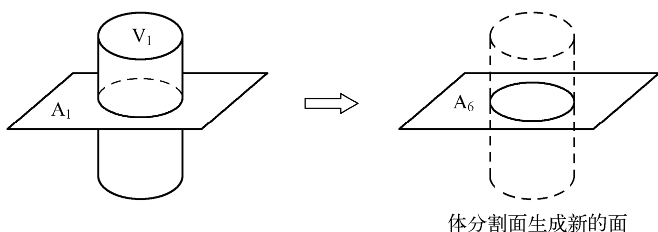


图 1-31 用体分割面

提示：1 个圆柱体包含 4 个面，再加上原有的面 A_1，新生成面的编号应为 A_6。

（8）用工作平面分割线

Command：LSBW

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | Line by WrkPlane

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | With Options | Line by WrkPlane

图 1-32 是用工作平面分割线后的结果。

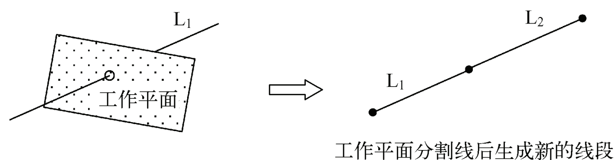


图 1-32 工作平面分割线

注意：用工作平面分割实体后得到的新实体编号从原实体的最小编号开始。

（9）用工作平面分割面

Command：ASBW

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | Area by WrkPlane

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | With Options | Area by WrkPlane

图 1-33 是用工作平面分割面后的结果。

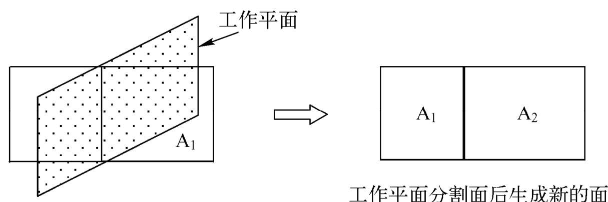


图 1-33　工作平面分割面

（10）用工作平面分割体

Command：VSBW

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | Volume by WrkPlane

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Devide | With Options | Volume by WrkPlane

图 1-34 是用工作平面分割体后的结果。

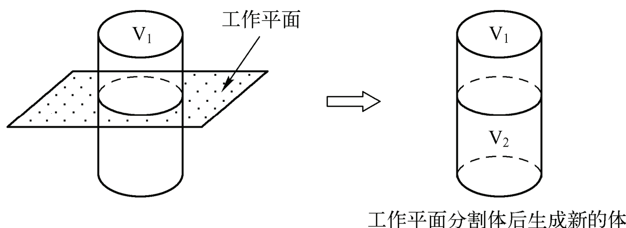


图 1-34　工作平面分割体

6．叠合操作

叠合操作的含义是将两个或多个实体相交后以其交点、交线及交面为边界，将原有实体分为三个或多个新实体。它包括线段叠合、面叠合及体叠合 3 类。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）线段叠合

Command：LOVLAP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Lines

图 1-35 是线段叠合后的结果。

（2）面叠合

Command：AOVLAP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Areas

图 1-36 是面叠合后的结果。

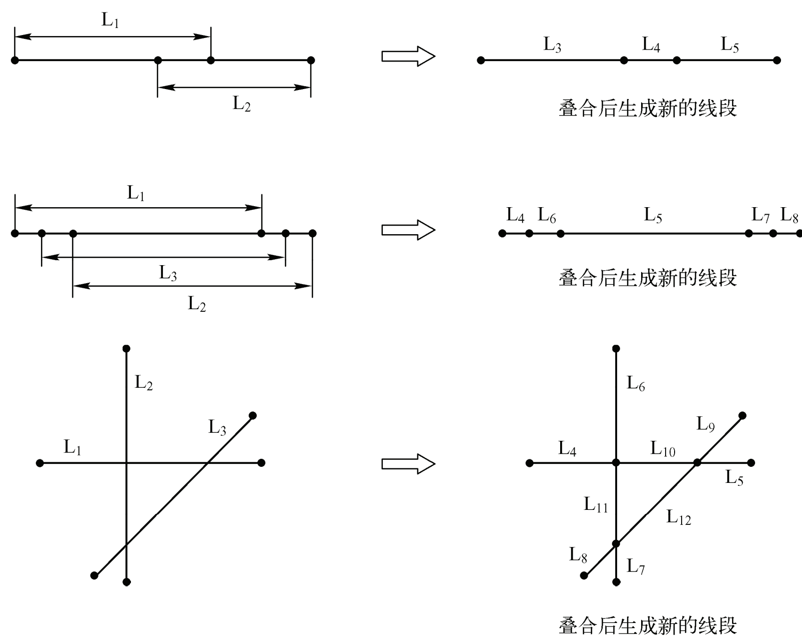


图 1-35 线段叠合

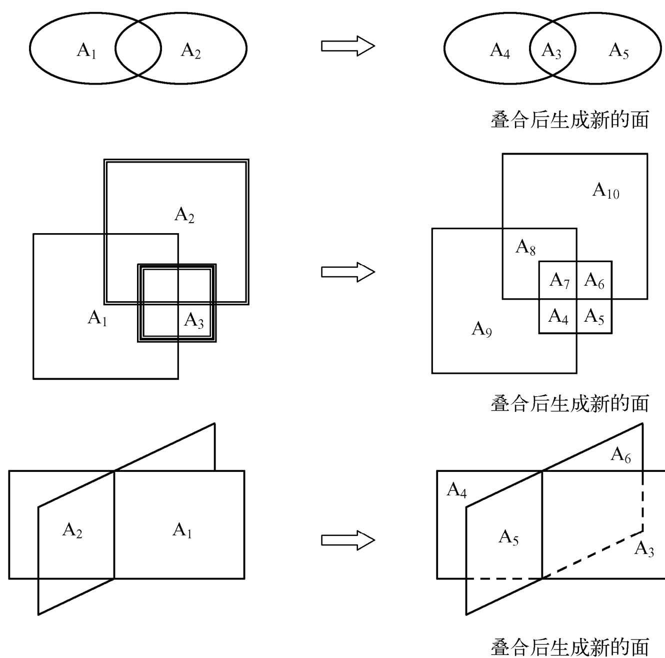


图 1-36 面叠合

（3）体叠合

Command：VOVLAP

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Overlap｜Volumes

图 1-37 是体叠合后的结果。

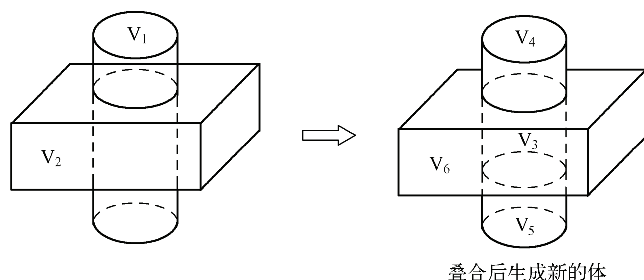


图 1-37　体叠合

7．粘合操作

粘合操作的含义是将两个或多个独立实体进行粘合，得到新的实体具有共同的交点、交线及交面，它包括线段粘合、面粘合及体粘合 3 类。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

注意：进行粘合操作的实体必须具有同位置重合的关键点、线或面。

（1）线段粘合

Command：LGLUE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Lines

图 1-38 是线段粘合后的结果。

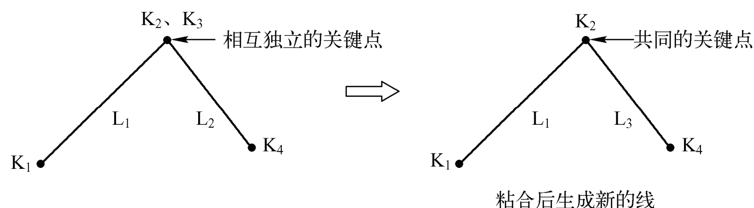


图 1-38　线段粘合

（2）面粘合

Command：AGLUE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Areas

图 1-39 是面粘合后的结果。

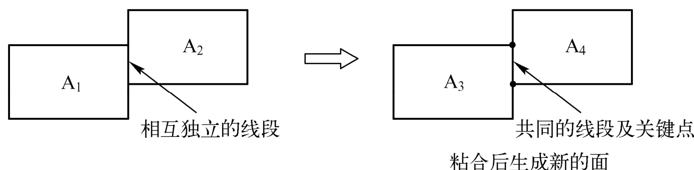


图 1-39　面粘合

（3）体粘合

Command：VGLUE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Volumes

图 1-40 是体粘合后的结果。

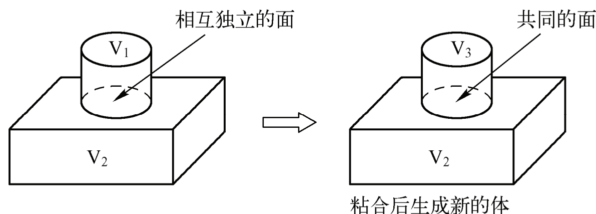


图 1-40 体粘合

注意：粘合操作后生成新实体的编号不同于其他布尔操作，应以实际操作为准。

8．分离操作

分离操作的含义是将两个或多个实体分开以得到更多新的实体，它包括线段分离、面分离及体分离 3 类。分离操作和叠合操作得到的结果类似。下面分别以命令流、GUI（界面操作）及图形显示方式分类进行介绍。

（1）线段分离

Command：LPTN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Partition | Lines

图 1-41 是线段分离后的结果。

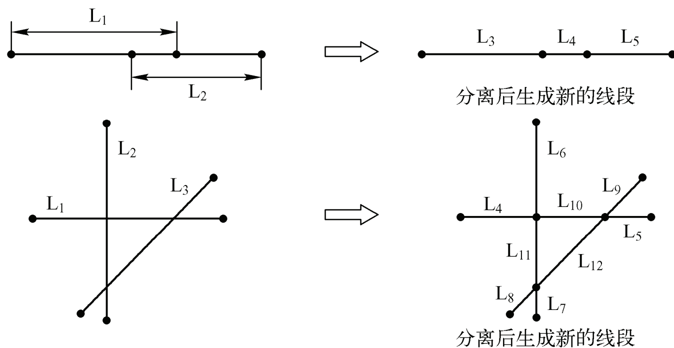


图 1-41 线段分离

（2）面分离

Command：APTN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Partition | Areas

图 1-42 是面分离后的结果。

（3）体分离

Command：VPTN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Partition | Volumes

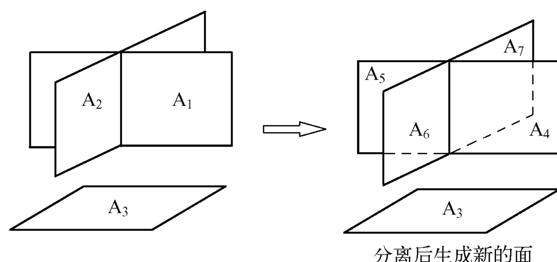


图 1-42　面分离

图 1-43 是体分离后的结果。

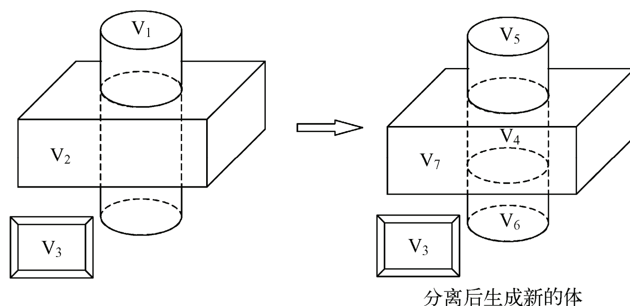


图 1-43　体分离

9．布尔操作后实体的显示

在布尔操作之后，一般需要对所生成的新实体进行显示，以便让操作者判断是否生成了需要的图形。ANSYS 具有列表显示及图形显示两种显示功能，下面分别以命令流、GUI（界面操作）方式分类进行介绍。

（1）显示关键点

Command：KLIST（列表显示）

GUI：Utility Menu | List | Keypoint | Coordinates Only

GUI：Utility Menu | List | Keypoint | Coords+Attributes

GUI：Utility Menu | List | Keypoint | Hard Points

Command：KPLOT（图形显示）

GUI：Utility Menu | Plot | Keypoints | Keypoints

GUI：Utility Menu | Plot | Keypoints | Hard Points

（2）显示线段

Command：LLIST（列表显示）

GUI：Utility Menu | List | Lines

Command：LPLOT（图形显示）

GUI：Utility Menu | Plot | Lines

（3）显示面

Command：ALIST（列表显示）

GUI：Utility Menu | List | Areas

Command：ADGL（列表显示退化的面）

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Show Degeneracy | List Degen Areas

Command：APLOT（图形显示）

GUI：Utility Menu | Plot | Areas

Command：APLOT（图形显示退化的面）

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Show Degeneracy | Plot Degen Areas

（4）显示体

Command：VLIST（列表显示）

GUI：Utility Menu | List | Volumes

Command：VDGL（列表显示退化的体）

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Show Degeneracy | List Degen Volus

Command：VPLOT（图形显示）

GUI：Utility Menu | Plot | Volumes

Command：VPLOT（图形显示退化的体）

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Show Degeneracy | Plot Degen Volus

1.4.2 图形显示设置技巧——字体设置与窗口显示

1．字体设置

ANSYS 提供了多种中英文字体，用户可以通过以下的 GUI 操作方式设置主菜单、工具栏菜单、应用菜单中的字体：

GUI：Utility Menu | MenuCtrls | Font Selection

执行上述的 GUI 操作后，出现 ANSYS Application Font 对话框，如图 1-44 所示，在 Scheme 下拉选框中选择 User Fonts，在 Item 下拉选框中选择需要改变字体的选项（包括 Dialog Font、Main Menu Heading Font、Main Menu Leaf Font、Utility Menu Font、Message Box Font、Status Bar Font），在 Font 列表框中便可以选择自己喜欢的字体了。另外，在 Font style 列表框中可以选择字体的类型，在 Size 列表框中可以选择字体的大小。

若要改变图形窗口中的字体，可进行以下 GUI 操作：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Legend Font

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Entity Font

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Anno/Graph Font

执行上述的 GUI 操作后，出现“字体”对话框，如图 1-45 所示，在该对话框中便可以对图形窗口中的字体进行设置了。

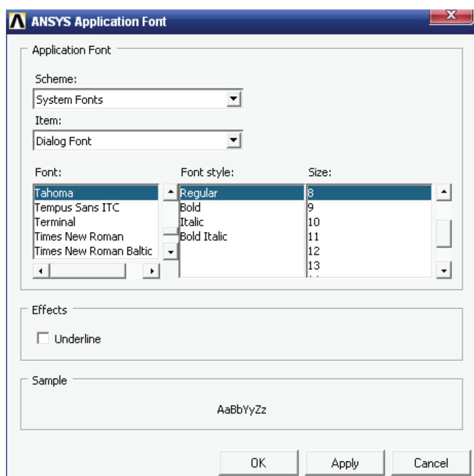


图 1-44　ANSYS 字体设置对话框

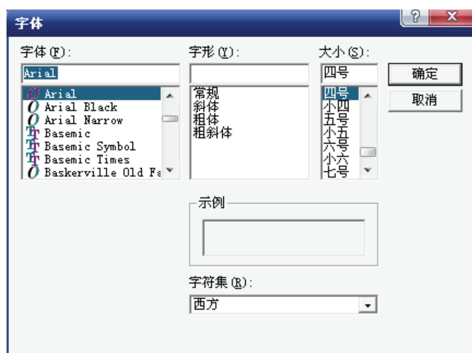


图 1-45　图形窗口字体设置对话框

2．图形窗口显示设置

ANSYS 图形窗口主要显示用户进行 ANSYS 操作的结果，包括用户建立的部分或全部几何模型、模型加载结果、有限元计算模型、计算结果的等值线、曲线显示等，ANSYS 可以根据用户的要求对图形窗口的显示形式进行设置，下面介绍几种常用的图形窗口显示形式。

1）改变图形窗口的显示颜色：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video

执行上述 GUI 操作后，ANSYS 图形窗口的显示颜色将变为原来颜色的反色，如图 1-46 所示。

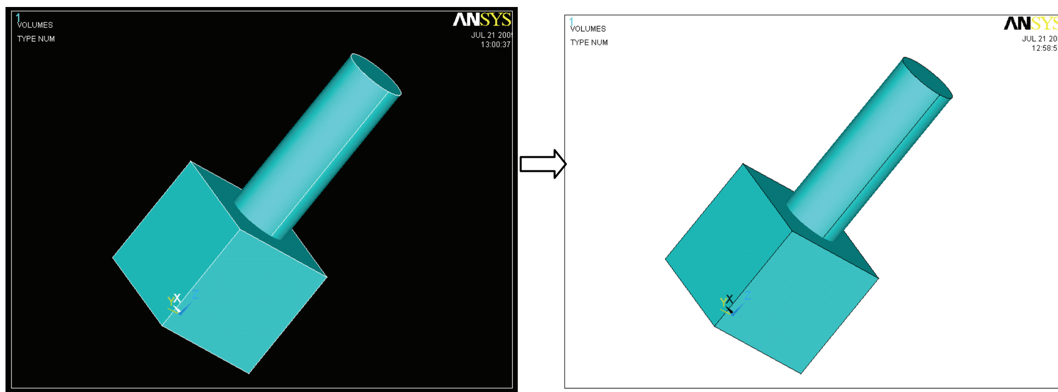


图 1-46　ANSYS 图形窗口颜色的变化

2）分解图形窗口：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Multi-Window Layout

执行上述的 GUI 操作后，出现 Multi-Plotting 对话框，在该对话框中可设置将 ANSYS 图形窗口分解的个数及形式，如选择 Four（2Top/2Bot），如图 1-47 所示，则 ANSYS 图形窗

口被分解为 4 个，如图 1-48 所示。

此时，如需要对其中某个显示窗口进行操作（图形缩放、颜色设置等），可将快捷菜单左上角的下拉选框中的显示数字设置为该窗口的编号（如图 1-48 所示），即可对该窗口内的图形进行单独操作了。

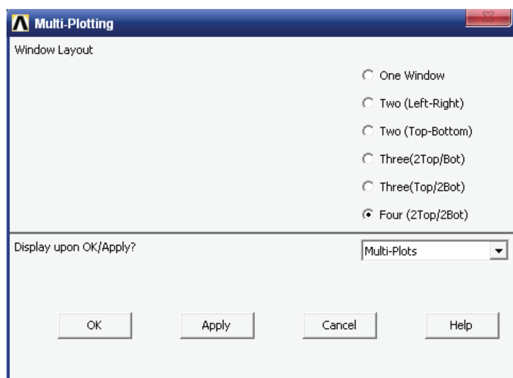


图 1-47 多窗口显示设置对话框

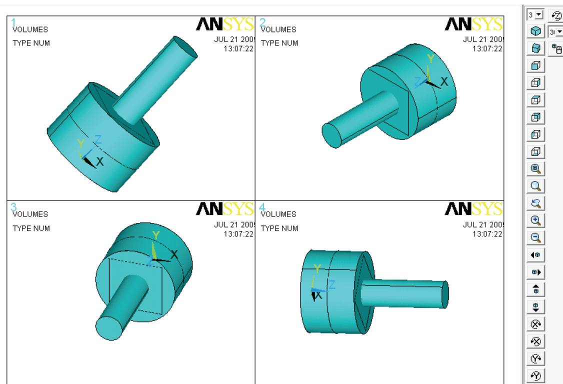


图 1-48 将图形窗口分解为 4 个

3）图形窗口显示设置：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Window Layout

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Window Options

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Reset Window Options

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Window On or Off

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Copy Window Specs

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Window Controls | Delete Window

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Angle of Rotation

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Magnification

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Focus Point

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Perspective View

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Automatic Fit Mode

执行上述 GUI 操作，用户可以对图形窗口的整体布局、显示形式、开关控制、删除与复制、视图显示方向及角度、视图缩放、透视方向等进行设置。

4）图形窗口中字体的改变：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Legend Font

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Entity Font

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Font Controls | Anno/Graph Font

执行上述 GUI 操作后，出现“字体”对话框，在该对话框中便可以对图形窗口中的字体进行设置了。

5）计算结果图形显示方式：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Device Options

执行上述 GUI 操作后，出现 Device Options 对话框，如图 1-49 所示，在该对话框中便可以对计算结果图形显示方式进行设置了。在默认情况下，ANSYS 以云图的形式显示计算结果，如图 1-50 所示。若将 Device Options 对话框中的[/DEV] Vector mode（wireframe）选项设置为 On，则 ANSYS 将以向量形式显示计算结果，如图 1-51 所示。

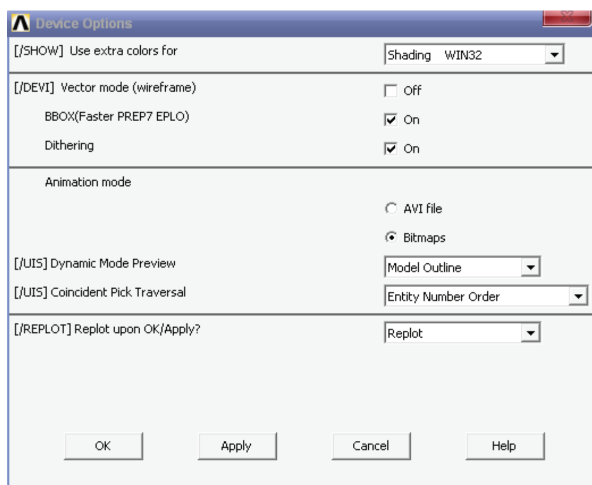


图 1-49　图形显示方式设置对话框

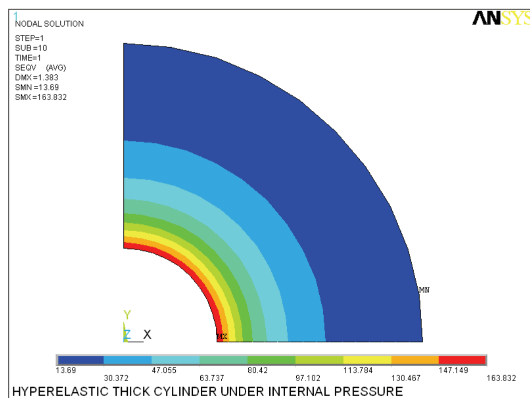


图 1-50　云图形式显示

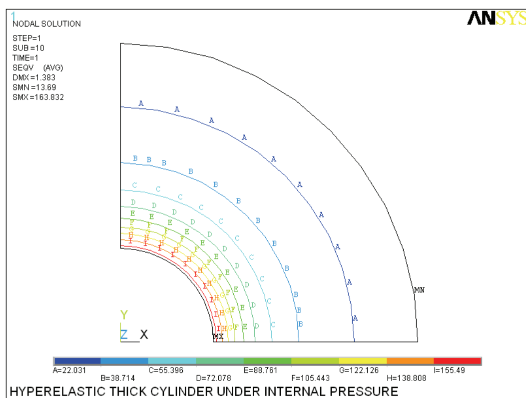


图 1-51　向量形式显示

1.4.3 结果文件输出技巧——图形复制与输出

ANSYS 可通过以下 GUI 操作方式对图形窗口所显示的图形进行复制并输出：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Capture Image

执行上述 GUI 操作后，出现 Image1 对话框，如图 1-52 所示，ANSYS 将复制整个图形窗口并生成图形文件，用户可以通过执行该对话框中的 File | Save As 操作或 File | Print 操作对该图形文件进行存储或打印输出。

注意：该操作存储的图形文件格式默认为 BMP。

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Hard Copy｜To File

执行上述 GUI 操作后，出现图形文件设置菜单，如图 1-53 所示，在该菜单中，用户可以设置图形文件的格式、是否进行压缩及图形颜色等。

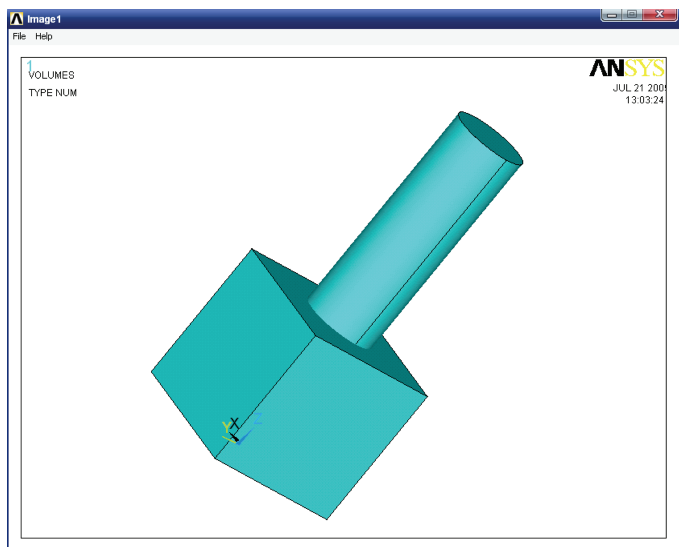


图 1-52 生成图形文件

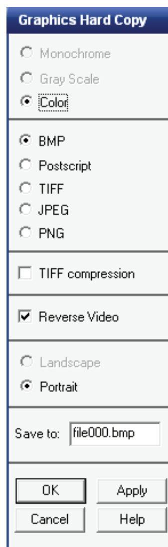


图 1-53 图形文件设置菜单

注意：该操作存储的图形文件格式可以为 BMP、Postscript、TIFF、JPEG 及 PNG。

提示：ANSYS 默认的存储文件名为 file000.bmp，用户可以在 Save to 输入栏中改写文件名。

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Hard Copy｜To Printer

执行上述 GUI 操作，可直接将图形窗口的图形进行打印输出。

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To GRPH File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To PSCR File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To HPGL File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To HPGL2 File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To JPEG File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To TIFF File

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Redirect Plots｜To PNG File

执行上述 GUI 操作，ANSYS 可直接将图形窗口的图形存储为相应格式的图形文件。

提示：存储时默认文件名为 file000、file001、file002……

1.4.4 生成动画文件技巧——动画文件的生成与存储

ANSYS 不仅可以将某个连续的物理过程离散化后进行数值模拟，而且也可以将模拟结果进行准连续化处理，即生成动画文件。ANSYS 生成动画文件的操作如下：

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Mode Shape
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Deformed Shape
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Deformed Results
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Over Time
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Time Harmonic
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Over Results
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Q-Slice Contours
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Q-Slice Vectors
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Isosurfaces
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Particle Flow

执行上述的 GUI 操作，可以将模拟结果生成动画文件。此时，用户不仅可以将模型的变形过程进行动画模拟，也可以将模型变形过程中的应力、应变、温度等参量信息进行动画模拟。

提示：ANSYS 生成的动画文件为 avi 格式。

ANSYS 存储动画文件的操作如下：
GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Animate | Save Animation

第 2 章　ANSYS 16.1 模型建立及实例详解



本章导读：

本章介绍 ANSYS 16.1 建立模型和网格划分的基本过程及工程应用实例，通过对各种典型实体进行建模及网格划分，使读者熟悉实体建模的基本方法和基本步骤。

2.1　模型建立基本过程

2.1.1 模型介绍

ANSYS 使用的模型可分为两大类：实体模型和有限元模型。类似于 CAD，以数学的方式表达结构的几何形状，即实体模型。该类模型可以在其中填充节点和单元，也可以在模型边界上施加载荷及约束。而有限元模型是由节点和单元组成，专门供有限元分析计算用的一类模型。实体模型并不参与有限元分析，所有施加在实体模型边界上的载荷或约束必须传递到有限元模型上，即节点和单元上进行求解。

2.1.2 模型建立方法

ANSYS 程序提供了 4 种创建模型的方法：

- 直接建模
- 实体建模
- 输入在计算机辅助设计系统（CAD）中创建的实体模型
- 输入在计算机辅助设计系统中创建的有限元模型

1．直接建模

这种建模方法是在 ANSYS 显示窗口中直接创建节点和单元，模型中没有实体（点、线、面）出现。其特点如下：

（1）优点

- 适用于小型模型、简单模型以及规律性较强的模型；
- 可实现对每个节点和单元编号的完全控制。

（2）缺点

- 需人工处理的数据量大，效率低；
- 不能使用自适应网格划分功能；
- 网格修正非常困难；
- 不适合进行优化设计；
- 容易出错。

2．实体建模

实体建模是先创建由关键点、线段、面和体构成的几何模型，然后利用 ANSYS 网格划分工具对其进行网格划分，生成节点和单元，最终建立有限元模型的一种建模方法。这种建模方法具有以下特点：

（1）优点

- 适合于复杂模型，尤其适合于 3D 实体建模；
- 需人工处理的数据量小，效率高；
- 允许对节点和单元实施不同的几何操作；
- 支持布尔操作（相加、相减、相交等）；
- 支持 ANSYS 优化设计功能；
- 可以进行自适应网格划分；
- 可以进行局部网格细化；
- 便于修正和改进。

（2）缺点

- 有时需要大量的 CPU 处理时间；
- 对小型、简单的模型有时很烦琐；
- 在特定的条件下可能会失败（即程序不能生成有限元网格）。

3．输入在计算机辅助设计系统（CAD）中创建的实体模型

ANSYS 程序为不同的软件提供了导入导出接口，利用这些接口，用户可以将在 CAD 系统建立的实体模型以一定的格式导入 ANSYS 程序进行分析。

如果从 CAD 系统导入的实体模型不适合进行网格划分，则需要进行大量的修补工作。此时需要利用 ANSYS 提供的拓扑和几何修复工具，并经过相应的几何简化才能满足使用要求。

从 CAD 系统导入实体模型的操作方法为：

GUI：Utility Menu | File | Import

4．输入在计算机辅助设计系统（CAD）中创建的有限元模型

该方法是利用 CAD 系统在网格划分方面的优势，预先将实体模型划分为有限元模型，然后通过一定的格式导入到 ANSYS。导入到 ANSYS 中的有限元模型在使用之前一般需要经过检验和修正。

从 CAD 系统导入有限元模型的操作方法为：

GUI：Utility Menu | File | Import

2.1.3 ANSYS 坐标系与工作平面

在进行建模之前，必须了解 ANSYS 坐标系和工作平面的定义和使用方法。



1．坐标系

坐标系用于定义几何结构的空间位置，规定节点的自由度，以及改变图形显示和列表。ANSYS 中有以下坐标系：

- 总体坐标系；
- 局部坐标系；
- 节点坐标系；
- 单元坐标系；
- 显示坐标系；
- 结果坐标系。

尽管 ANSYS 可以定义多个坐标系，但在同一时刻只能有一个坐标系被激活。系统总是首先激活笛卡儿坐标系（直角坐标系），如果定义了新的局部坐标系，该新坐标系就会被系统自动激活。ANSYS 在运行的任意时刻都可以激活任意一个坐标系，激活坐标系的方法如下：

Command：CSYS

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cartesian

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cylindrical

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cylindrical Y

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Spherical

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Specified Coord Sys

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Working Plane

在创建实体时，无论当前哪个坐标系被激活，ANSYS 都将坐标显示为 X、Y、Z，如果当前坐标系不是笛卡儿坐标系，则对柱坐标系而言，坐标 X、Y、Z 代表 R、θ、Z；对于球坐标系，坐标 X、Y、Z 代表 R、θ、Φ。

下面分别简单介绍上述 6 种坐标系的定义和使用方法。

（1）总体坐标系

总体坐标系用于确定几何结构的空间位置，是一个绝对参考系。ANSYS 中有 3 种总体坐标系可供选择：笛卡儿坐标系、柱坐标系、球坐标系，并且都是右手系，具有共同的原点。定义这 3 种坐标系的方法如下。

- 定义笛卡儿坐标系：

Command：CSYS，0

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cartesian

- 定义柱坐标系：

Command：CSYS，1

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cylindrical

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cylindrical Y

- 定义球坐标系：

Command：CSYS，2

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Spherical

（2）局部坐标系

在某些情况下，用户必须创建自己的局部坐标系，其特点为：原点相对于总体坐标系的

原点偏离了一定的距离或各轴相对于总体坐标系偏转了一定的角度。

局部坐标系的定义方法如下。

- 在特定位置（笛卡儿坐标系）定义局部坐标系：

Command：LOCAL

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Create Local CS｜At Specified Loc

- 通过已有节点定义局部坐标系：

Command：CS

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Create Local CS｜By 3 Nodes

- 通过已有关键点定义局部坐标系：

Command：CSKP

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Create Local CS｜By 3 Keypoints

- 以当前定义的工作平面的原点为中心定义局部坐标系：

Command：CSWPLA

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Create Local CS｜At WP Origin

此外，还可以通过 CLOCAL 命令将已激活的坐标系定义为局部坐标系，该命令没有对应的 GUI。

删除局部坐标系的方法如下：

Command：CSDELE

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Delete Local CS

查看局部坐标系的方法如下：

Command：CSLIST

GUI：Utility Menu｜List｜Local Other｜Local Coord Sys

（3）节点坐标系

节点坐标系用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，在默认的情况下总是平行于总体笛卡儿坐标系，并与其他坐标系无关。

定义节点坐标系的方法如下：

- 将节点坐标系旋转到当前激活坐标系的方向

Command：NROTAT

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Nodes｜Rotate Node CS｜To Active CS

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Move/Modify｜Rotate Node CS｜To Active CS

- 按照给定的旋转角旋转节点坐标系

Command：NMODIF

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Nodes｜Rotate Node CS｜By Angles

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Move/Modify｜Rotate Node CS｜By Angles



● 通过新坐标系各轴的方向余弦旋转节点坐标系

Command：NANG

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Nodes｜Rotate Node CS｜By Vectors

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Move/Modify｜Rotate Node CS｜By Vectors

显示节点坐标系的方法如下：

Command：NLIST

GUI：Utility Menu｜List｜Nodes

GUI：Utility Menu｜List｜Picked Entities

（4）单元坐标系

单元坐标系用于规定正交材料特性的方向和面力结果的输出方向，每个单元均有各自的单元坐标系，并且均为正交右手系。

在大多数情况下，单元坐标系的默认方向遵循以下原则：

● 线单元 X 轴正方向由该单元的 I 节点指向 J 节点；
● 壳单元 X 轴正方向由该单元的 I 节点指向 J 节点，Z 轴与壳面垂直并且过 I 点，其正方向由单元的 I、J、K 节点按右手准则确定；
● 2D 实体和 3D 实体单元的单元坐标系总是平行于总体笛卡儿坐标系。

对于面单元和体单元，可通过以下方法修改单元坐标系的方向：

Command：ESYS

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜Mesh Attributes｜Default Attribs

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Elements｜Elem Attributes

（5）显示坐标系

在默认情况下，节点和单元结果列表显示采用总体笛卡儿坐标系，改变显示坐标系的方法如下：

Command：DSYS

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Display CS to｜Global Cartesian

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Display CS to｜Global Cylindrical

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Display CS to｜Global Cylindrical Y

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Display CS to｜Global Spherical

GUI：Utility Menu｜WorkPlane｜Change Display CS to｜Specified Coord Sys

上述操作对 LPLOT、APLOT、VPLOT 命令无影响。

（6）结果坐标系

在默认情况下，结果数据显示采用总体笛卡儿坐标系，改变结果坐标系的方法如下：

Command：RSYS

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Options for Output

GUI：Utility Menu｜List｜Results｜Options

2．工作平面

工作平面是一个可以移动的参考平面，相当于一个虚拟的绘图板，所有的实体模型都将在工作平面上生成。

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系、捕捉增量和显示栅格。在同一时刻，只能定义一个工作平面，定义新的工作平面，ANSYS 会自动删除原来的工作平面。

注意：工作平面与坐标系相互独立。

ANSYS 默认的工作平面为总体笛卡儿坐标系的 X-Y 面，该坐标系的 X 轴和 Y 轴分别为工作平面的 WX 轴和 WY 轴。

（1）显示工作平面

Command：WPSTYL，STAT

GUI：Utility Menu | List | Status | Working Plane

（2）定义工作平面

- 通过坐标位置定义工作平面

Command：WPLANE

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | XYZ Locations

- 通过 3 个节点定义工作平面

Command：NWPLAN

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Nodes

- 通过 3 个关键点定义工作平面

Command：KWPLAN

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Keypoints

- 通过线段及其上 1 点定义工作平面

Command：LWPLAN

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Plane Normal to Line

- 通过现有坐标系定义工作平面

Command：WPCSYS

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Active Coord Sys

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Global Cartesian

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Specified Coord Sys

（3）移动和旋转工作平面

- 将工作平面的原点移动到关键点的中间位置

Command：KWPAVE

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | Keypoints

- 将工作平面的原点移动到节点的中间位置

Command：NWPAVE

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | Nodes

- 将工作平面的原点移动到指定位置

Command：WPAVE

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | Global Origin

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | Origin of Active CS

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP to | XYZ Locations

● 平移工作平面

Command：WPOFFS

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

● 旋转工作平面

Command：WPROTA

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments

（4）还原已定义的工作平面

在 ANSYS 中，工作平面不能存储，但是可以通过在工作平面的原点创建局部坐标系来还原已定义的工作平面。

● 在工作平面的原点创建局部坐标系

Command：CSWPLA

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At WP Origin

● 利用局部坐标系还原已定义的工作平面

Command：WPCSYS

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Active Coord Sys

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Align WP with | Specified Coord Sys

（5）增强工作平面、显示栅格、打开捕捉功能

用 WPSTYL 命令可以增强工作平面的功能，使其具有显示栅格、捕捉增量等功能，以便使用户更精确地选择坐标和关键点等，使得建模过程更加迅捷、方便。

2.1.4 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法：自底向上建模与自顶向下建模。自底向上进行实体建模时，用户从最低级的图元向上构造模型，即：用户首先定义关键点，然后依次是相关的线、面、体。图 2-1 所示为自底向上的建模过程。

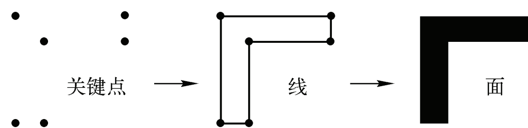


图 2-1　自底向上的建模过程

自顶向下进行实体建模时，用户定义一个模型的最高级图元，如球、多面体、棱柱等，称为基元，程序会自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型，如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。

无论使用自底向上或自顶向下方法建模，用户均能使用布尔运算来组合数据集，从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算，诸如相加、相减、相交、分割、粘合和叠合。在创建复杂实体模型时，对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、旋转、移动、延伸和复制实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相

交运算、自动倒角生成、用于网格划分的硬点的建立、移动、复制和删除。

1．自底向上建模

自底向上的建模过程是先创建关键点，再依次创建相关的线、面和体等高级图元。

（1）关键点

1）定义关键点。

● 定义单个关键点

Command：K

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | On Working Plane

● 在已知线段上的给定位置定义关键点

Command：KL

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | On Line

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | On Line w/Ratio

2）通过已有关键点生成关键点。

● 在 2 个关键点之间生成单个关键点

Command：KBETW

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP between KPs

● 在 2 个关键点之间生成多个关键点

Command：KFILL

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Fill between KPs

● 在中心位置生成关键点

Command：KCENTER

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP at Center | 3 keypoints

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP at Center | 3 KPs and radius

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | KP at Center | Location on line

● 复制生成关键点

Command：KGEN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Keypoints

● 映像生成关键点

Command：KSYMM

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Keypoints

● 将关键点转移至另一个坐标系中

Command：KTRAN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Transfer Coord | Keypoints

● 将关键点转移至 1 个交点上

Command：KMOVE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Keypoint | To Intersect

● 在已知的节点处定义关键点

Command：KNODE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | On Node



3）查看、选择和删除关键点。

● 列表显示关键点

Command：KLIST

GUI：Utility Menu | List | Keypoints | Coordinates＋Attributes

GUI：Utility Menu | List | Keypoints | Coordinates only

GUI：Utility Menu | List | Keypoints | Hard Points

● 图形显示关键点

Command：KPLOT

GUI：Utility Menu | Plot | Keypoints | Keypoints

GUI：Utility Menu | Plot | Specified Entities | Keypoints

● 选择关键点

Command：KSEL

GUI：Utility Menu | Select | Entities

● 删除关键点

Command：KDELE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Keypoints

● 显示关键点编号

Command：/PNUM，KP，1

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Numbering

● 计算两关键点的直线距离

Command：KDIST

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Check Geom | KP distances

● 修正关键点

Command：KMODIF

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Keypoints | Set of KPs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Keypoints | Single KP

（2）硬点

硬点是一种特殊的关键点，利用这种关键点，用户可以施加载荷或者从模型上的任意点获得数据。硬点的存在不会改变模型的几何形状和拓扑结果。关键点的大部分命令都适用于硬点，另外，硬点还有自己单独的命令集。

1）硬点的定义。

● 在线段上定义单个硬点

Command：HPTCREATE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on line | Hard PT by ratio

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on line | Hard PT by coordinates

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on line | Hard PT by picking

● 在面上定义单个硬点

Command：HPTCREATE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on area | Hard PT by coordinates

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | Hard PT on area | Hard PT by picking

2）硬点的查看、选择和删除。

● 列表显示硬点

Command：KLIST

GUI：Utility Menu | List | Keypoint | Hard Points

● 图形显示硬点

Command：KPLOT

GUI：Utility Menu | Plot | Keypoint | Hard Points

● 选择硬点

Command：KSEL

GUI：Utility Menu | Select | Entities

● 删除硬点

Command：HPTDELETE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Hard Points

（3）线

线主要用于表示几何结构的边。与关键点一样，线也需要在当前的激活坐标系内定义。只有在生成线单元或通过线来定义面的时候才需要定义线。在很多情况下，ANSYS 会自动生成相关的线。

1）定义线。

● 生成直线段

Command：LSTR

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line

● 由 2 个关键点生成直线段

Command：L

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord

● 生成圆弧线

Command：LARC

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | By End KPs ＆ Rad

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Throug 3 KPs

● 生成圆

Command：CIRCLE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | By Cent & Radius

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Arcs | Full Circle



● 生成样条曲线

Command：BSPLIN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | Spline thru KPs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | Spline thru Locs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options | Spline thru KPs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options | Spline thru Locs

● 生成分段样条曲线

Command：SPLINE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | Segmented Spline

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options | Segmented Spline

● 生成与 1 条已知线段成一定角度的线段

Command：LANG

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | At Angle to Line

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Normal to Line

● 生成与 2 条已知线段成一定角度的线段

Command：L2ANG

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Angle to 2 Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Norm to 2 Lines

● 生成与 1 条已知线段具有共同终点且相切的线段

Command：LTAN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Tangent to Line

● 生成与 2 条已知线段相切的线段

Command：L2TAN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Tan to 2 Lines

● 生成 2 个关键点之间最短的线段

Command：LAREA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Overlaid on Area

● 由关键点按一定路径延伸生成线段

Command：LDRAG

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Keypoints | Along Lines

● 由关键点按某一轴线旋转生成圆弧线

Command：LROTAT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Keypoints | About Axis

● 在 2 条相交线之间生成倒角线

Command：LFILLT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet

● 复制生成线

Command：LGEN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Lines

● 映射生成线

Command：LSYMM

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines

● 通过转移到不同坐标系来创建线

Command：LTRAN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Transfer Coord | Lines

2）线的修改。

● 细分一条线

Command：LDIV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line into 2 Ln's

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line into N Ln's

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Line w/Options

● 合并线

Command：LCOMB

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines

● 延长线

Command：LEXTND

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extend Line

3）线的查看和删除。

● 列表显示线

Command：LLIST

GUI：Utility Menu | List | Lines

● 图形显示线

Command：LPLOT

GUI：Utility Menu | Plot | Lines

GUI：Utility Menu | Plot | Specified Entities | Lines

● 选择线

Command：LSEL

GUI：Utility Menu | Select | Entities

● 删除线

Command：LDELE

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Delete｜Line and Below

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Delete｜Lines Only



**提示**：只有未依附于面并且未划分网格的线才能重新定义、修改或删除，但是对于LDIV、LCOMB、LFILLT命令，可以对依附于面或体的线段进行操作。

（4）面

1）定义面。

● 通过关键点定义面

Command：A

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜Through KPs

● 通过线段定义面

Command：AL

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜By Lines

● 拖拉线定义面

Command：ADRAG

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Extrude｜Lines｜Along Lines

● 绕轴旋转线定义面

Command：AROTAT

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Extrude｜Lines｜About Axis

● 面倒角

Command：AFILLT

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Area Fillet

● 通过引导线生成光滑曲面

Command：ASKIN

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜By Skinning

● 通过偏移已有的面生成面

Command：AOFFST

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Arbitrary｜By Offset

● 复制生成面

Command：AGEN

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Copy｜Areas

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Move/Modify｜Areas｜Areas

● 映像生成面

Command：ARSYM

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Reflect｜Areas

● 通过转移到不同坐标系来创建面

Command：ATRAN

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Move/Modify｜Transfer Coord｜Areas

2）面的操作。

● 面相加

Command：AADD

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Add｜Areas

● 面相减

Command：ASBA

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜Areas

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜With Options｜Areas

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Divide｜Area by Area

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Divide｜With Options｜Area by Area

● 面叠加

Command：AOVLAP

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Overlap｜Areas

3）面的查看、选择和删除。

● 列表显示面

Command：ALIST

GUI：Utility Menu｜List｜Areas

● 图形显示面

Command：APLOT

GUI：Utility Menu｜Plot｜Areas

GUI：Utility Menu｜Plot｜Specified Entities｜Areas

● 选择面

Command：ASEL

GUI：Utility Menu｜Select｜Entities

● 删除面

Command：ADELE

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Delete｜Area and Below

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Delete｜Areas Only

提示：只有未依附于体并且未划分网格的面才能重新定义、修改或删除；在删除面时，如果选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Delete｜Area and Below，则从属于该面的低阶图元（关键点、节点、线等）将会一起被删除。

（5）体

1）创建体。

● 通过关键点生成体

Command：V

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Arbitrary | Through KPs

● 通过面生成体

Command：VA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Arbitrary | By Areas



● 沿某一路径拖拉面生成体

Command：VDRAG

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Lines

● 绕轴旋转面生成体

Command：VROTAT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | About Axis

● 沿面的法线方向拉伸面生成体

Command：VOFFST

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal

● 沿坐标轴拉伸面生成体

Command：VEXT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | By XYZ Offset

● 复制生成体

Command：VGEN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Volumes

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Volumes

● 映像生成体

Command：VSYMM

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Volumes

● 通过转移到不同坐标系来创建体

Command：VTRAN

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Transfer Coord | Volumes

2）体的操作。

● 体相加

Command：VADD

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes

● 体相减

Command：VSBV

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | With Options | Volumes

● 体叠加

Command：VOVLAP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Volumes

3）体的查看、选择和删除。

● 列表显示体

Command：VLIST

GUI：Utility Menu | List | Volumes

● 图形显示面体

Command：VPLOT

GUI：Utility Menu | Plot | Volumes

GUI：Utility Menu | Plot | Specified Entities | Volumes

● 选择体

Command：VSEL

GUI：Utility Menu | Select | Entities

● 删除体

Command：VDELE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Volume and Below

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Volumes Only

2．自顶向下建模

自顶向下的建模过程指的是一开始便从较高级的实体图元构造模型。在这种方式下，ANSYS 在生成一种体素时会自动生成所有的从属于该体素的较低级的图元。

（1）生成 2D 基本图元

ANSYS 中的 2D 基本图元包括矩形面、圆面、圆环面和多边形面，如图 2-2 所示。

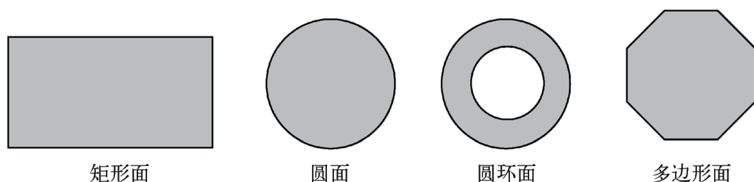


图 2-2　2D 基本图元

1）生成矩形面。

● 通过坐标值生成矩形面

Command：RECTNG

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions

● 通过 2 个对角点生成矩形面

Command：BLC4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By 2 Corners

● 通过中心点和 1 个对角点生成矩形面

Command：BLC5

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Centr & Cornr

2）生成圆形面。

● 通过坐标值生成圆面

Command：PCIRC

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | By Dimensions

● 通过圆心和半径生成圆环面或圆面



Command：CYL4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Annulus

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Partial Annulus

● 通过终点生成圆面

Command：CYL5

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | By End Points

3）生成多边形面。

● 通过外接圆圆心和半径生成多边形面

Command：RPR4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Triangle

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Square

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Pentagon

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Hexagon

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Septagon

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | Octagon

● 通过内、外切圆半径生成多边形面

Command：RPOLY

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | By Inscribed Rad

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | By Circumscr Rad

● 通过边长生成多边形面

Command：RPOLY

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | By Side Length

● 通过鼠标拾取生成多边形面

Command：PRI2

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Polygon | By Vertices

（2）生成 3D 基本图元

ANSYS 提供的 3D 体素有 6 种，包括块体、圆柱体、棱柱体、球体、圆台及环体，如图 2-3 所示。

1）生成块体。

● 通过坐标值生成块体

Command：Block

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions

● 通过 2 个对角点和 Z 坐标值生成块体

Command：BLC4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By 2 Corners ＆ Z

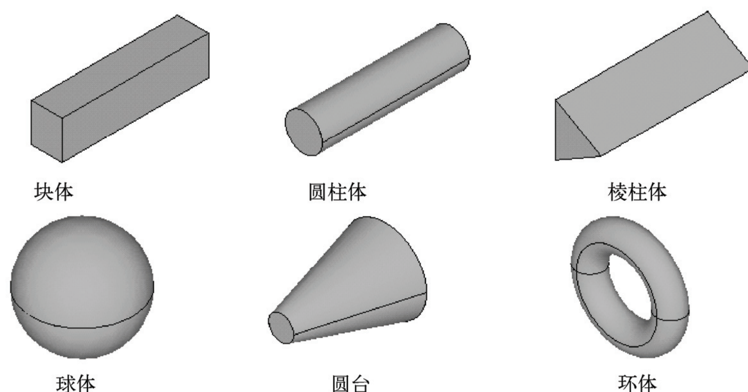


图 2-3　3D 体素

● 通过中心点、对角点和 Z 坐标值生成块体

Command：BLC5

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Centr, Corners, Z

2）生成圆柱体。

● 通过坐标值生成圆柱体

Command：CYLIND

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By Dimensions

● 通过圆心、半径及长度生成圆柱体或中空圆柱体

Command：CYL4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Solid Cylinder

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Hollow Cylinder

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder

● 通过终点和长度生成圆柱体

Command：CYL5

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | By End Pts ＆ Z

3）生成棱柱体。

● 通过横截面外接圆圆心、半径及长度生成棱柱体

Command：RPR4

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Triangular

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Square

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Pentagonal

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Hexagonal

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Septagonal
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | Octagonal

● 通过横截面内、外切圆半径和长度生成棱柱体

Command：RPOLY
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | By Inscribed Rad
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | By Circumscr Rad

● 通过横截面边长和长度生成棱柱体

Command：RPOLY
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Prism | By Side Length

4）生成球体。

● 通过坐标值生成球体

Command：SPHERE
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Sphere | By Dimensions

● 通过球心和半径生成球体或中空球体

Command：SPH4
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Sphere | Solid Sphere
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Sphere | Hollow Sphere

● 通过终点和半径生成球体

Command：SPH5
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Sphere | By End Points

5）生成圆台。

● 通过坐标值生成圆台

Command：CONE
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cone | By Dimensions

● 通过中心点、底面和顶面的半径及长度生成圆台

Command：CON4
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cone | By Picking

6）生成环体。

Command：TORUS
GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Torus

注意：在生成多个相接触的体素后，它们之间会产生一条不连续的接缝，必须采用NUMMRG、VADD、VGLUE 等命令除去接缝。

2.1.5 网格划分

除直接生成有限元模型外，所有实体模型在进行分析求解之前，必须对其划分网格，生成有限元模型。

网格划分过程可分为以下 3 个步骤：

- 定义单元类型；
- 定义网格生成控制；
- 生成网格。

1．定义单元类型

在划分网格之前，通常需要指定分析对象的特征，即定义单元类型。主要包括 3 个基本类型的常数定义：单元类型和单元类型属性定义；实常数定义；材料属性定义。下面分别予以介绍。

（1）单元类型和单元类型属性定义

ANSYS 16.1 提供了 100 余种单元用于工程分析，经常使用的单元有以下几类。

- 线单元：用于单个单元上应力为常数的情况；
- 梁单元：用于螺栓、薄壁管件、角钢、型材或细长薄膜构件等模型；
- 杆单元：用于弹簧、螺杆、预应力螺杆或桁架等模型；
- 弹簧单元：用于弹簧、螺杆、细长结构或通过刚度等效替代复杂结构等模型；
- 壳单元：用于薄板或曲面模型（面板厚度需小于其板面尺寸的 1/10）；
- 面单元：普遍用于各种 2D 模型或可简化为 2D 的模型；
- 实体单元：用于各种 3D 实体模型。

定义单元类型方法如下：

Command：ET

GUI：Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete

执行上述命令后，出现如图 2-4 所示的 Element Types 对话框，单击其上的 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，如图 2-5 所示，可在此对话框中选择相应的单元类型。

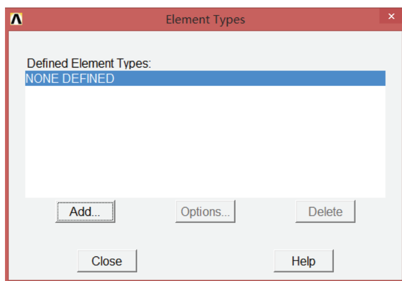


图 2-4 定义单元类型对话框

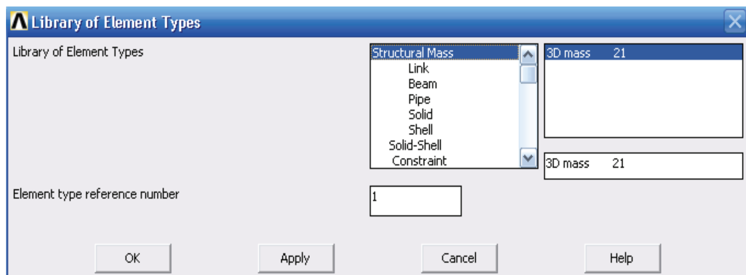


图 2-5 单元类型列表对话框

选择单元的基本原则是在满足求解精度的前提下尽量采用低维数的单元，即选择单元优先级从高到低依次为点、线、面、壳、实体。同时还应注意以下两点：

- 线单元的扭曲变形可能引起求解精度损失；
- 在求解精度方面，线单元和二次单元之间的差别远没有平面单元和三维实体单元之间的差别大。



单元类型属性的定义方法如下：

- 给关键点分配属性

Command：KATT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Keypoints

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Picked KPs

- 给线段分配属性

Command：LATT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Picked Lines

- 给面分配属性

Command：AATT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Areas

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Picked Areas

- 给体分配属性

Command：VATT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Volumes

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Picked Volumes

- 设置默认属性

Command：TYPE、REAL、MAT、ESYS、SECNUM

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes

（2）定义实常数

为了准确求解，有必要对所选择的单元的几何特征进行补充，这些补充以实常数的形式体现出来。单元实常数通常包括：壳单元的厚度、梁单元的横截面面积、惯性矩、平面单元的轴对称特性等。

实常数的定义方法如下：

Command：R

GUI：Main Menu | Preprocessor | Real Constant

（3）定义材料属性

Command：MP、MPDATA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models

GUI：Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Other | Change Mat Props | Material Models

执行上述命令后，ANSYS 会打开如图 2-6 所示的对话框，用户可在此对话框中选择相

应的材料模型。ANSYS 提供了 100 余种材料模型供用户选用。

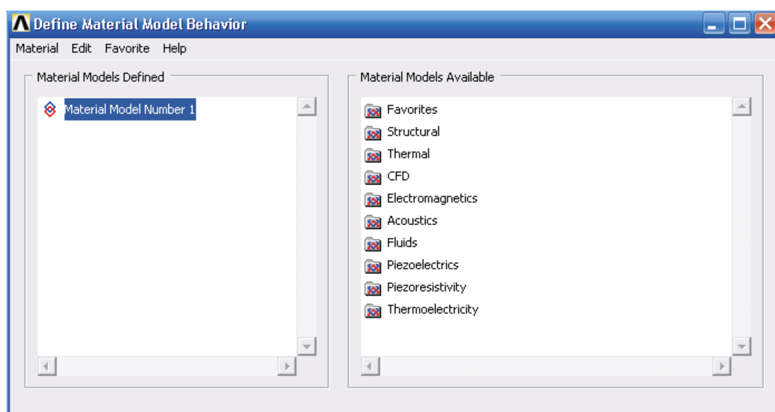


图 2-6　定义材料属性对话框

2．网格密度控制

在一般情况下，采用默认网格控制可以使模型生成足够的网格，此时不需指定任何网格划分控制。但如果要得到更精确的网格划分结果，则需在对模型进行网格划分前实施网格划分控制，采用如下方法可进行网格划分控制。

- 进行线段默认网格划分设置

Command：ESIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Adv Opts

Command：DESIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Other

- 对距关键点最近的线段进行网格划分设置

Command：KESIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Keypoints | All KPs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Keypoints | Clr Size

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Keypoints | Picked KPs

- 对所选线段进行网格划分设置

Command：LESIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Clr Size

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Copy Divs

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Flip Bias

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked

Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Layers | Picked Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Layers | Clr Layers

● 对面上线段进行网格划分设置

Command：AESIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Areas | All Areas

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Areas | Clr Size

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Areas | Picked Areas

● 智能网格划分设置

Command：SMARTSIZE

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Adv Opts

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Basic

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Status

3．网格划分方法

ANSYS 程序提供了便捷、高质量地对几何模型进行网格划分的功能。主要包括 4 种网格划分方法：自由网格划分、映射网格划分、延伸网格划分和自适应网格划分。

（1）自由网格划分

ANSYS 程序的自由网格划分功能十分强大，这种网格划分方法没有单元形状的限制，网格也不遵循任何模式，因此适合于对复杂形状的面和体进行网格划分，这就避免了用户对模型各个部分分别划分网格后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。

对面进行网格划分，自由网格可以只由四边形单元组成，或者只由三角形单元组成，或者二者混合。对体进行自由网格划分，一般指定网格为四面体单元，六面体单元作为过渡也可以加入到四面体网格中。若要严格定义单元形状，可通过以下方法实现：

Command：MSHAPE、MSHKEY

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts

图 2-7 所示为规则几何形状和不规则几何形状自由网格划分结果显示。

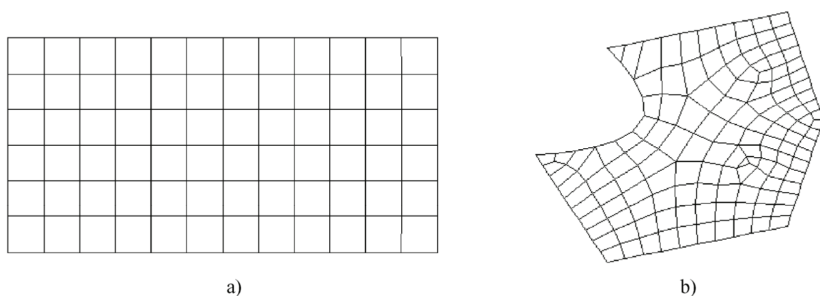


图 2-7 自由网格划分结果显示

a) 规则形状自由网格划分 b) 不规则形状自由网格划分



（2）映射网格划分

映射网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映射网格，映射网格划分主要适合于规则的面和体，单元成行并具有明显的规则形状，仅适用于四边形单元（对面）和六面体（对体）。图 2-8 所示为映射网格划分结果显示。

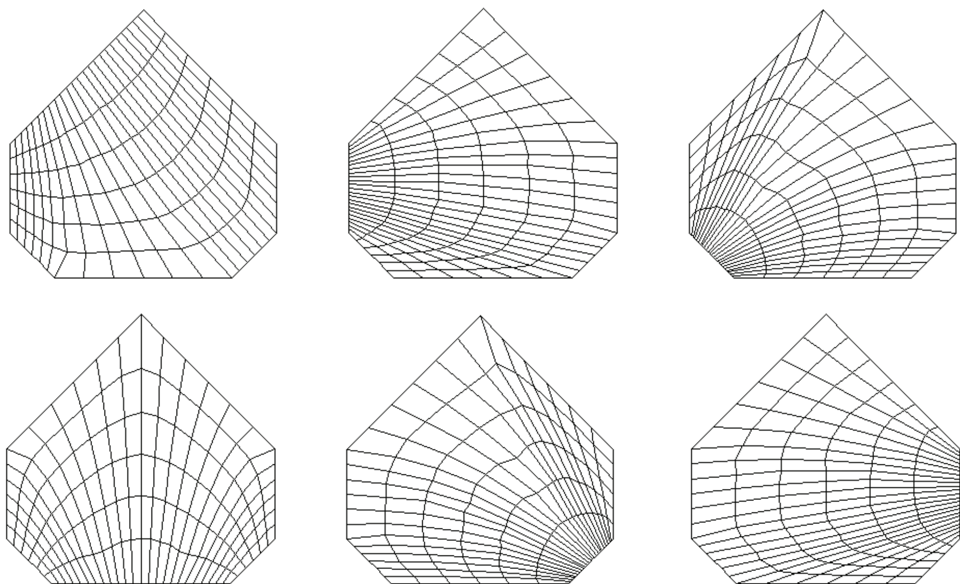


图 2-8 采用不同相交角时的映射网格划分结果

（3）延伸网格划分

延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格，主要是利用体扫掠，从体的某一边界面扫掠贯穿整个体而生成体单元。如果需扫掠的面由三角形网格组成，体将生成四面体单元，如果面网格由四边形网格组成，体将生成六面体单元，如果面由三角形和四边形单元共同组成，则体将由四面体和六面体单元共同填充。图 2-9 所示为延伸网格划分结果显示。

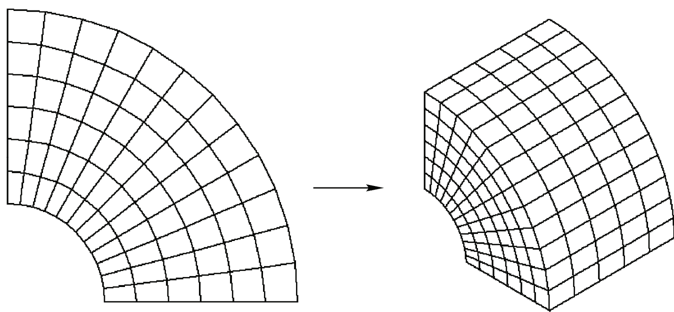


图 2-9 延伸网格划分结果

（4）自适应网格划分

自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格

的离散误差，直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

4．网格划分工具

网格划分工具是网格控制的一种快捷方式，它可以方便地实现单元属性控制、智能网格划分控制、单元尺寸控制、选择自由网格划分或映射网格划分控制、执行网格划分、清除网格划分及局部网格细化。打开网格划分工具操作如下：

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool

执行上述操作之后，ANSYS 将打开网格划分工具，如图 2-10 所示，该对话框一旦打开，将一直保持开启状态，除非单击其上的 Close 按钮关闭之或退出前处理器。

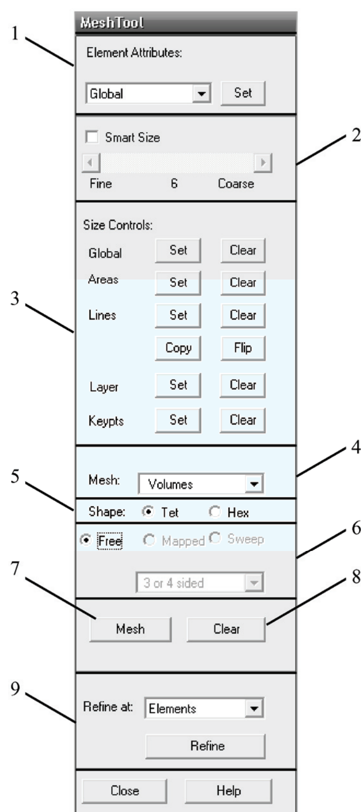


图 2-10　网格划分工具对话框

图 2-10 中相应编号对应如下：

1——单元属性控制

2——智能网格划分级别控制

3——单元尺寸控制

4——选择网格划分实体

5——指定单元形状

6——选择自由网格划分或映像网格划分

7——执行网格划分

8——清除网格

9——局部网格细化

5．实体模型的网格划分

对实体模型进行网格划分的方法有多种，下面介绍主要的网格划分方法。

（1）用 *x*MESH 命令划分网格

● 在关键点处生成点单元

Command：KMESH

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Keypoints

● 在线段上生成线单元

Command：LMESH

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines

● 在面上生成面单元

Command：AMESH

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Target Surf

Command：AMAP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | 3 or 4 sided

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | By Corners

● 在体上生成体单元

Command：VMESH

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | 4 to 6 sided

（2）生成带有方向节点的梁单元网格

方向关键点能使 ANSYS 在关键点所在位置沿着梁单元自动生成方向节点。方向关键点与待划分网格的线是相互独立的。

可以将方向关键点定义为线的属性，其方法如下：

Command：LATT

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | All Lines

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Picked Lines

支持生成带有方向节点的梁单元有：BEAM161、BEAM188 和 BEAM189。使用方向节点对梁进行网格划分能够控制因梁截面取向对分析结果造成的影响。

（3）由面生成体网格

通过单个面的表面单元也可以生成体网格，其操作方法如下：

Command：FVMESH

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Tet Mesh From | Area Elements

（4）通过扫掠生成体网格

利用体扫掠可以从体上一边界面的网格扫掠贯穿整个尚未划分单元的体模型来生成有限元模型。体扫掠的操作方法如下：

Command：VSWEEP

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volume Sweep | Sweep Opts

GUI：Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volume Sweep | Sweep

2.2 直接法实体建模实例详解

2.2.1 问题描述

图 2-11 所示为一薄板的有限元模型，试采用直接生成有限元模型的方法对其进行建模。

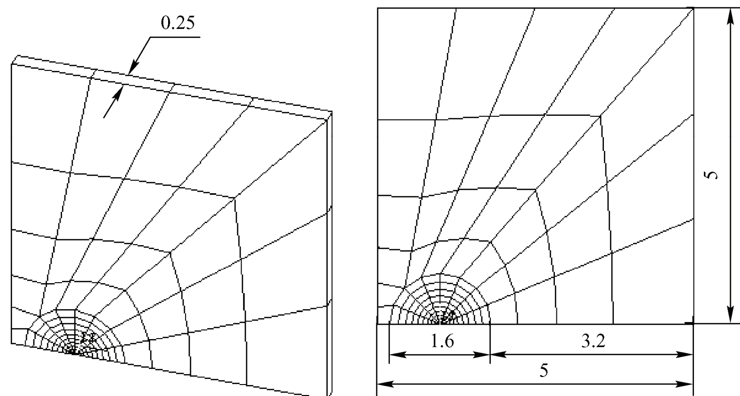


图 2-11 薄板的有限元模型

2.2.2 问题分析

采用直接生成节点和单元的方法建立薄板的有限元模型，选择 SOLID185 单元划分网格。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SOLID45 单元。

2.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu｜File｜Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，如图 2-12 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

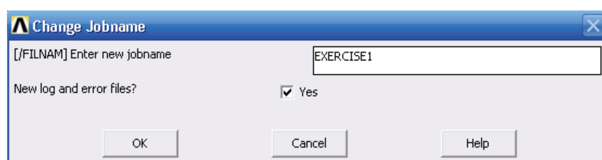


图 2-12 定义工作文件名

2）选择 Utility Menu｜File｜Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在［/TITLE］ Enter new title 输入栏中输入 CREATE FINITE ELEMENT MODEL BY DIRECT METHOD，如图 2-13 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

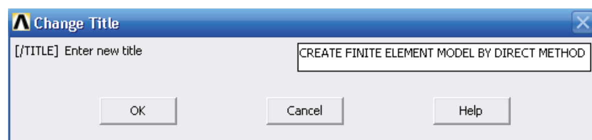


图 2-13 定义工作标题

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 8 node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 2-14 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

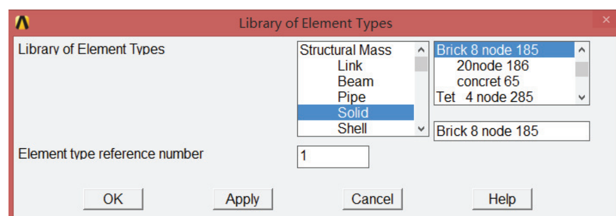


图 2-14 单元类型列表对话框

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．创建几何模型

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：此操作将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色转变为白色。

技巧：读者可通过执行 Utility Menu | MenuCtrls | Color Selection 命令对 ANSYS 系统颜色进行设置。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，如图 2-15 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | SmartSize | Basic 命令，出现 Basic SmartSize Settings 对话框，在 LVL　Size Level 下拉选框中选择 Off，如图 2-16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

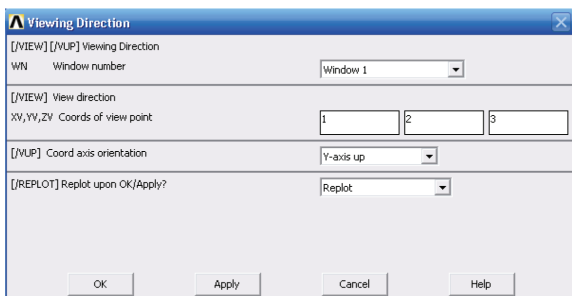


图 2-15　视图显示方向设置对话框

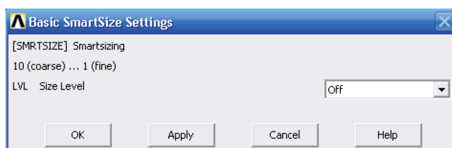


图 2-16　智能网格划分设置对话框

4）选择 Utility Menu | MenuCtrls | Message Controls 命令，出现 Message Controls 对话框，在 NMERR　Max number displayed 输入栏中输入 0，其余选项采用默认设置，如图 2-17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

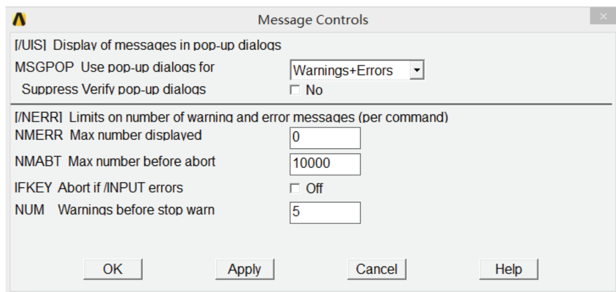


图 2-17　信息控制对话框

5）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前坐标系转变为柱坐标系。

注意：以下操作均在柱坐标系中进行。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 后面的 3 个输入栏中输入 0、0、0，如图 2-18 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：分别输入节点编号和节点坐标。

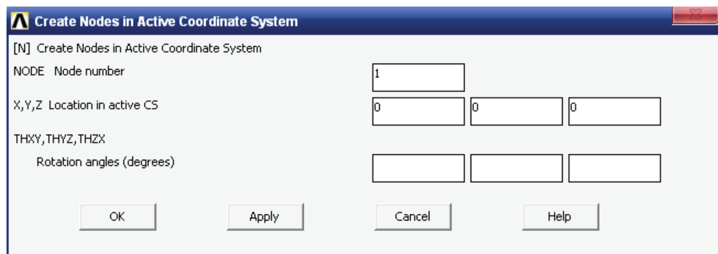


图 2-18 生成节点对话框

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy 命令，出现 Copy nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，如图 2-19 所示，单击 OK 按钮，出现 Copy nodes 对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 9，在 INC Node number increment 输入栏中输入 20，如图 2-20 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

技巧：出现 Copy nodes 拾取菜单后也可通过鼠标在 ANSYS 显示窗口选择编号为 1 的节点，编号显示可通过执行 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，在出现 Plot Numbering Controls 对话框后，选择其中的 Node Node numbers 即可。

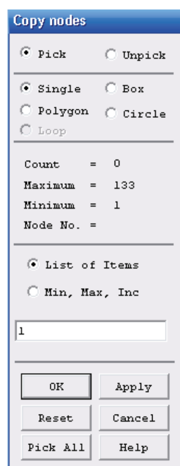


图 2-19 复制节点拾取菜单

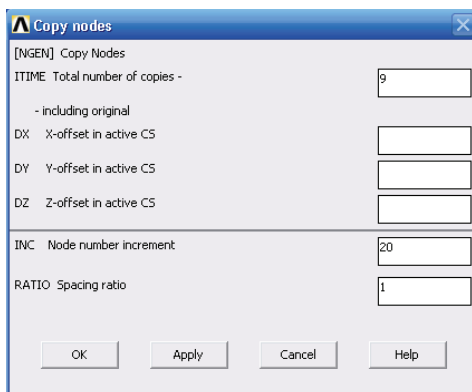


图 2-20 复制节点对话框

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 11，在 X,Y,Z Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入 0.8、0、0，单击 Apply 按钮；

在 NODE　Node number 输入栏中输入 171，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入 0.8、180、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 11，171，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，参照图 2-21 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。生成的节点结果如图 2-22 所示。

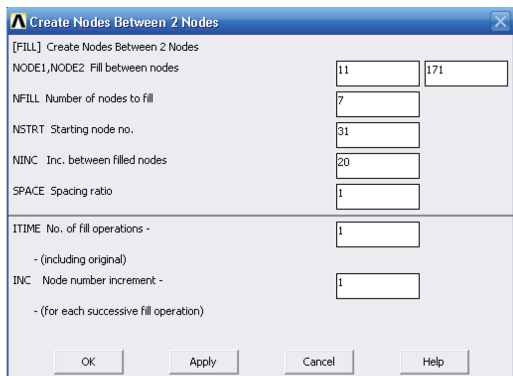


图 2-21　在两节点间创建节点对话框

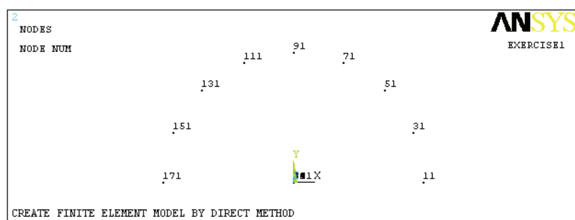


图 2-22　生成的节点结果显示

10）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为笛卡儿坐标系。

注意：以下操作将在直角坐标系中进行。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 1，11，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，在 NODE1, NODE2　Fill between nodes 后面的 2 个输入栏中分别输入 1、11，在 NFILL　Number of nodes to fill 输入栏中输入 9，在 NSTRT　Starting node no. 输入栏中输入 2，在 NINC　Inc. between filled nodes 输入栏中输入 1，在 SPACE　Spacing ratio 输入栏中输入 3，在 ITIME　No. of fill operations 输入栏中输入 9，在 INC　Node number increment 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。生成的节点结果如图 2-23 所示。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 15，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入 4、0、0，单击 Apply 按钮，在 NODE　Node number 输入栏中输入 75，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入 4、5、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 15，75，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，在 NODE1, NODE2　Fill between nodes 后面的 2 个输入栏中分别输入 15、75，在 NFILL　Number of nodes to fill 输入栏中输入 2，在 NSTRT　Starting node

no.输入栏中输入 35，在 NINC　Inc. between filled nodes 输入栏中输入 20，在其余输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 155，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入-1、5、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 75，155，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，在 NODE1, NODE2　Fill between nodes 后面的 2 个输入栏中分别输入 75、155，在 NFILL　Number of nodes to fill 输入栏中输入 3，在 NSTRT　Starting node no.输入栏中输入 95，在 NINC　Inc. between filled nodes 输入栏中输入 20，在其余输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 172，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入-1、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 155，172，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，在 NODE1, NODE2　Fill between nodes 后面的 2 个输入栏中分别输入 155、172，在 NFILL　Number of nodes to fill 输入栏中输入 5，在 NSTRT　Starting node no.输入栏中输入 177，在 NINC　Inc. between filled nodes 输入栏中输入-1，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.15，在其余输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。生成的节点结果如图 2-24 所示。

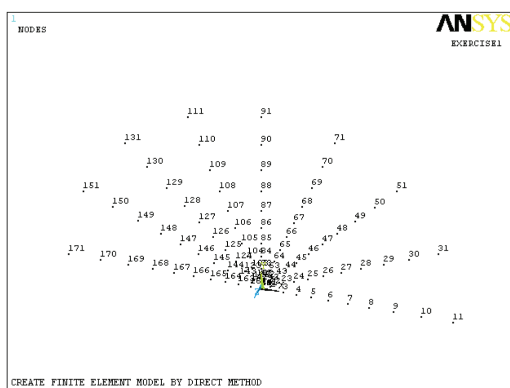


图 2-23　生成的节点结果显示

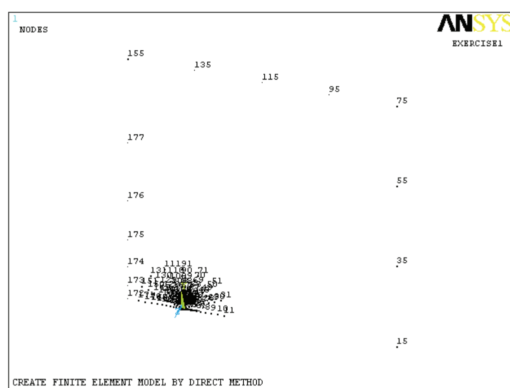


图 2-24　生成的节点结果显示

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 11，15，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，在 NODE1, NODE2　Fill between nodes 后面的 2 个输入栏中分别输入 11、15，在 NFILL　Number of nodes to fill 输入栏中输入 3，在 NSTRT　Starting node

no.输入栏中输入 12，在 NINC Inc. between filled nodes 输入栏中输入 1，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 3，在 ITIME No. of fill operations 输入栏中输入 7，在 INC Node number increment 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy 命令，出现 Copy nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy nodes 对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 2，在 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入 0.25，在 INC Node number increment 输入栏中输入 200，单击 OK 按钮关闭该对话框。生成的节点结果如图 2-25 所示。

20）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，22，1，1，202，222，201，201，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过节点生成单元。

22）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的单元，如图 2-26 所示。

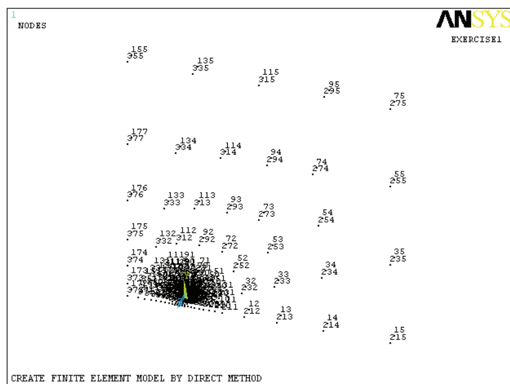


图 2-25　生成的节点结果显示

图 2-26　生成的单元结果显示

23）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 8，在 NINC Node number increment 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的单元，如图 2-27 所示。

25）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，3，23，22，202，203，223，222，单击 OK 按钮关闭该菜单。

26）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 9，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 8，在 NINC Node number increment 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

27）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在第 3 栏中选择 Min,Max,Inc，在输入栏中输入 9，16，1，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 9，在 NINC Node number increment 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

28）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的单元，如图 2-28 所示。

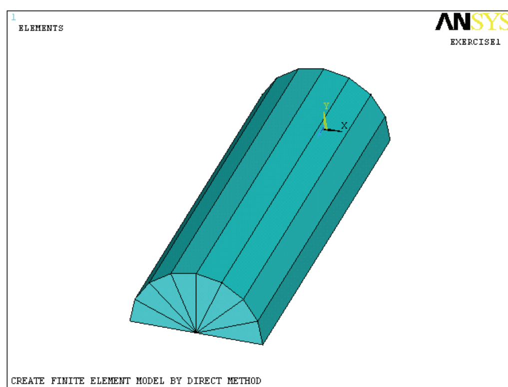


图 2-27 复制单元结果显示

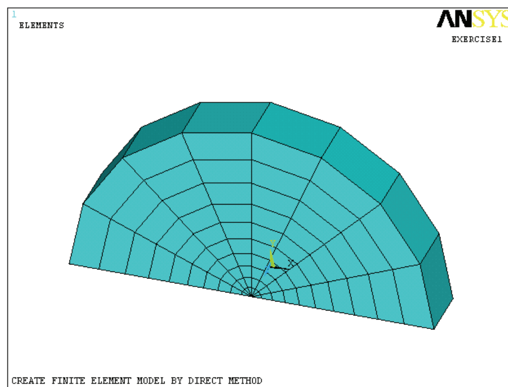


图 2-28 复制单元结果显示

29）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

30）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在第 3 栏中选择 Min,Max,Inc，在输入栏中输入 73，78，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 5，在 NINC Node number increment 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。复制单元结果如图 2-29 所示。

31）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 171，151，173，172，371，351，373，372，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 151，131，174，173，351，331，374，373，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 131，132，175，174，331，332，375，374，单击 OK 按钮关闭该菜单。

注意：须按节点次序输入其编号，输完一组之后一定要单击 Apply 按钮，表示输入完成。

32）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 107，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME　Total number of copies 输入栏中输入 3，在 NINC　Node number increment 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

33）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 134，135，155，177，334，335，355，377，单击 OK 按钮关闭该菜单。

34）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在［/TITLE］ Enter new title 输入栏中输入 FINITE ELEMENT MODEL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

35）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 2-30 所示。

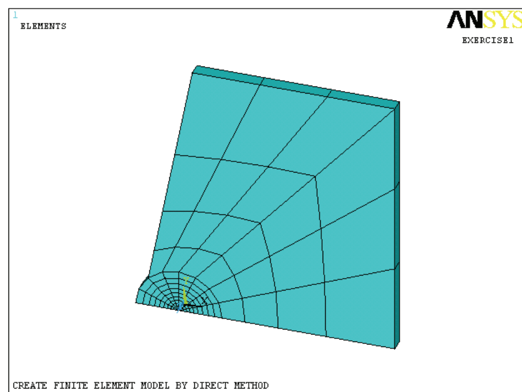


图 2-29　复制单元结果显示

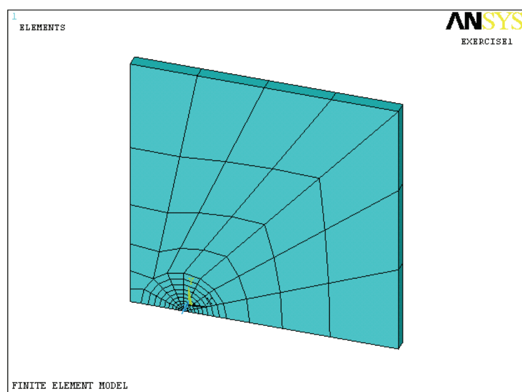


图 2-30　有限元模型结果显示

36）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-3.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

37）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试： 本例采用直接法建立有限元模型，读者可以看出建模过程比较复杂，在完成本章的后两个例题之后，读者可采用实体建模的方法对本例进行建模。

2.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                                   ！定义工作文件名
/TITLE，CREATE FINITE ELEMENT MODEL BY DIRECT METHOD
                                                      ！定义工作标题
/PREP7                                                ！进入前处理器
ET，1，SOLID185                                       ！定义单元类型
```

```
/VIEW，1，1，2，3                              ！设置视图显示方向
SMRT，OFF                                      ！关闭智能网格划分
/NERR，0                                       ！关闭信息提示
CSYS，1                                        ！将当前坐标系转变为柱坐标系
N，1，0，0，0                                  ！生成节点
NGEN，9，20，1                                 ！复制节点
N，11，0.8，0，0
N，171，0.8，180，0
FILL，11，171，7，31，20                       ！在2节点间生成节点
CSYS，0                                        ！将当前坐标系转变为笛卡儿坐标系
FILL，1，11，9，2，1，9，20，3
N，15，4，0，0
N，75，4，5，0
FILL，15，75，2，35，20
N，155，-1，5，0
FILL，75，155，3，95，20
N，172，-1，0，0
FILL，155，172，5，177，-1，，，.15
FILL，11，15，3，12，1，7，20，3
NGEN，2，200，1，177，，，，.25
SAVE
E，2，22，1，1，202，222，201，201              ！由节点生成单元
EPLOT                                          ！显示单元
EGEN，8，20，-1                                ！复制单元
EPLOT
E，2，3，23，22，202，203，223，222
EGEN，8，20，-1
EPLOT
EGEN，9，1，-8
SAVE
EGEN，5，1，73，78
E，171，151，173，172，371，351，373，372
E，151，131，174，173，351，331，374，373
E，131，132，175，174，331，332，375，374
EGEN，3，1，-1
E，134，135，155，177，334，335，355，377
/TITLE，FINITE ELEMENT MODEL
EPLOT
SAVE
FINISH
/EXIT                                          ！退出ANSYS
```

2.3 自底向上建模方法实例详解

2.3.1 问题描述

图 2-31 所示为一连杆结构示意图，壁厚为 50mm，试采用自底向上的建模方法建立几何模型并划分网格（图示长度单位为 mm）。

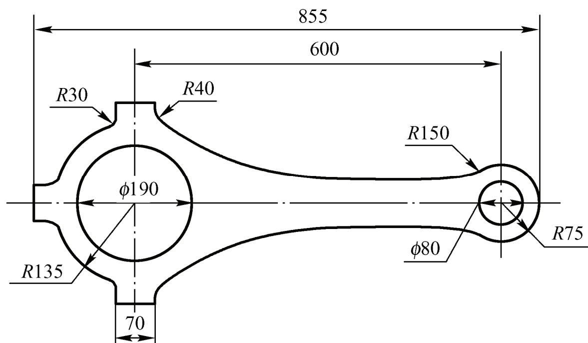


图 2-31 连杆结构示意图

2.3.2 问题分析

采用自底向上的建模方法建立连杆的几何模型，选择 SOLID185 单元划分网格。

2.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在［/TITLE］ Enter new title 输入栏中输入 MODELING AND MESHING TO A CONNECTING ROD，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 8 node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 2-32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

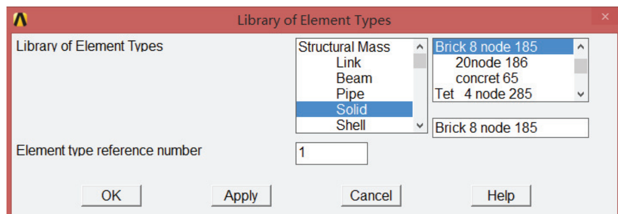


图 2-32 单元类型列表对话框

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．创建几何模型

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：此操作将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色转变为白色。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 KP　Keypoint numbers 和 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，如图 2-33 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

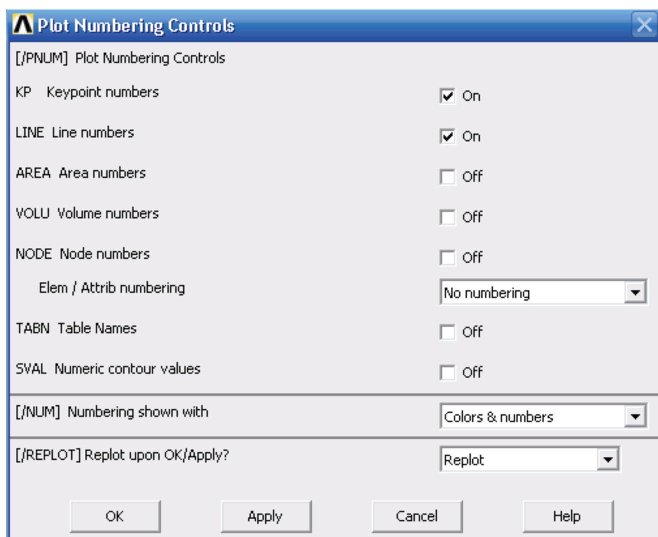


图 2-33　编号显示控制对话框

提示：此操作将显示关键点及线段的编号。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入-180、0、0，如图 2-34 所示。单击 Apply 按钮，参照上述的操作过程，分别输入第 2、3 个关键点的编号及其坐标：

2（-180，35，0）；　3（-135，　35，0）

注意：一个关键点编号及其坐标输入完成后需单击 Apply 按钮确认。

4）输入完成后单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 Apply 按钮，生成一条线段，在输入栏中输入 2，3，单击 Apply 按钮，生成另外一条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

技巧：可以通过鼠标拾取相应的关键点编号生成线段。

6）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的线段，如图 2-35 所示。

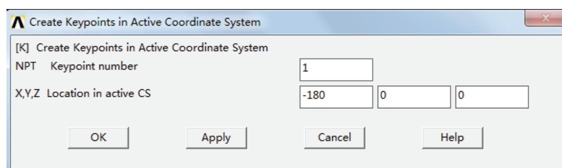


图 2-34　创建关键点对话框

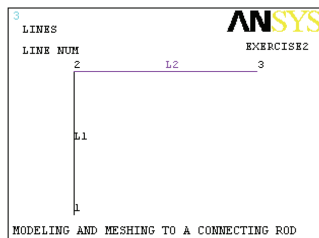


图 2-35　生成线段结果显示

7）选择 Utility Menu | Workplane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前激活坐标系转变成柱坐标系。

提示：以下的操作将在柱坐标系中进行。

8）参照第 3）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

4（135，135，0）；　5（95，180，0）；　6（95，135，0）

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 3，4，单击 Apply 按钮，生成一条线段，在输入栏中输入 5，6，单击 Apply 按钮，生成另外一条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet 命令，出现 Line Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 2，3，单击 OK 按钮，出现 Line Fillet 对话框，在 NL1,NL2 Intersecting lines 后面的 2 个输入栏中依次输入 2、3，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 30，如图 2-36 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对线段进行倒角。

11）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示线段倒角后的结果，如图 2-37 所示。

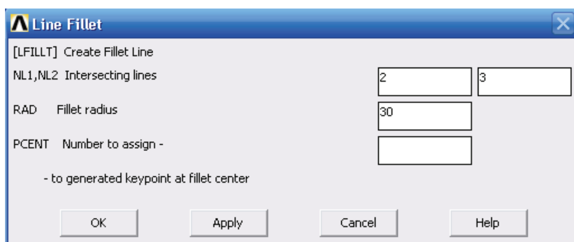


图 2-36　线段倒角对话框

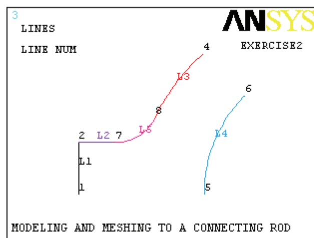


图 2-37　线段倒角结果显示

12）选择 Utility Menu | WorkPlane | Display Working Plane 命令，显示工作平面。

13）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 XY,YZ,ZX Angles 输入栏中输入 45，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Utility Menu | Workplane | Change Active CS to | Working Plane 命令，将当前激活坐标系设置为工作平面。

提示：以下操作将在工作平面所定义的坐标系中进行。

15）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines 命令，出现 Reflect Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Reflect Lines 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 选项中选择 Y-Z plane X，如图 2.38 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：沿 X 轴映射线段。

17）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示线段映射后的结果，如图 2-39 所示。

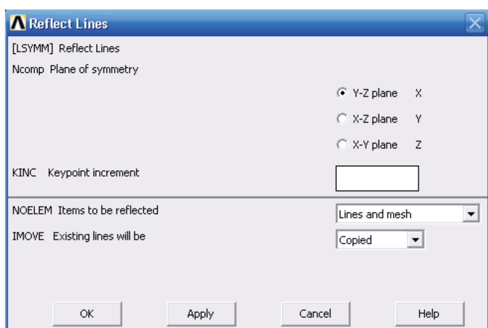


图 2-38 映射线段对话框

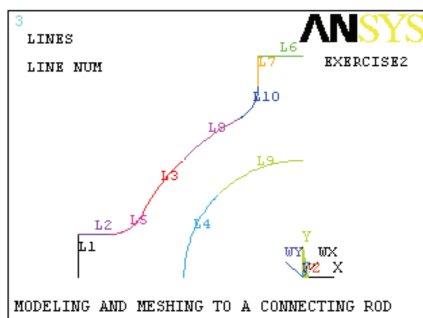


图 2-39 映射线段结果显示

18）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 XY,YZ,ZX Angles 输入栏中输入-45，单击 Apply 按钮，在 X,Y,Z Offsets 输入栏中输入 600，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：先旋转恢复初始状态，再平移。

19）选择 Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At WP Origin 命令，出现 Create Local CS at WP Origin 对话框，在 KCS Type of coordinate system 下拉菜单中选择 Cylindrical 1，如图 2-40 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

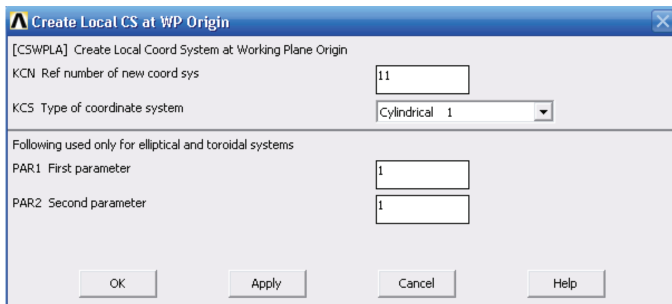


图 2-40 创建局部坐标系对话框

20）参照第 3）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

16（75，0，0）；　17（75，135，0）；

18（40，0，0）；　19（40，180，0）

21）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 16，17，单击 Apply 按钮，生成一条线段，在输入栏中输入 18，19，单击 Apply 按钮，生成另外一条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

22）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成线段的结果，如图 2-41 所示。

提示：为清晰起见，图 2-41 关闭了关键点和线段的编号显示。

23）选择 Utility Menu | Workplane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前激活坐标系转变成笛卡儿坐标系。

提示：以下操作将在直角坐标系中进行。

24）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines 命令，出现 Reflect Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，6，7，9，单击 OK 按钮，出现 Reflect Lines 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 选项中选择 Y-Z plane X，单击 OK 按钮关闭该对话框。

25）参照第 3）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

27（250，55，0）；　28（520，45，0）

26）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | Spline thru KPs 命令，出现 B-Spline 拾取菜单，在输入栏中输入 17，28，27，24，单击 OK 按钮关闭该菜单。

27）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口显示生成样条曲线的结果，如图 2-42 所示。

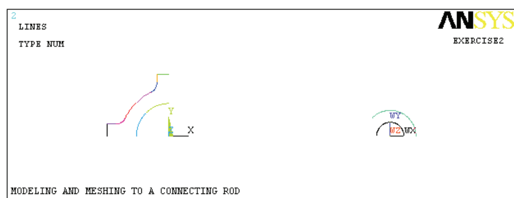


图 2-41　生成的线段结果显示

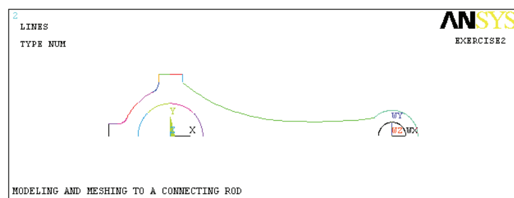


图 2-42　生成样条曲线结果显示

28）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Line Fillet 命令，出现 Line Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 15，17，单击 OK 按钮，出现 Line Fillet 对话框，在 NL1,NL2 Intersecting lines 后面的 2 个输入栏中依次输入 15、17，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 40，单击 Apply 按钮，出现 Line Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 11，17，单击 OK 按钮，出现 Line Fillet 对话框，在 NL1,NL2 Intersecting lines 后面的 2 个输入栏中依次输入 11、17，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 150，单击 OK 按钮关闭该对话框。

29）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

30）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Lines 命令，出现 Reflect Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Reflect Lines 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 选项中选择 X-Z plane Y，单击 OK 按钮关闭该对话框。

31）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label Type of item to be merge 下拉菜单中选择 Keypoints，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作为合并相同位置上重复定义的关键点。

32）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 KP Keypoint number 和 LINE Line number 选项，使其状态从 On 变为 Off。选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成的线段结果，如图 2-43 所示。

33）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

34）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create Area by Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 12，31，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 4，9，13，16，23，28，32，35，单击 Apply 按钮；用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择其余的 28 条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：分别生成两圆及连杆外轮廓的面。

35）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成的面结果，如图 2-44 所示。

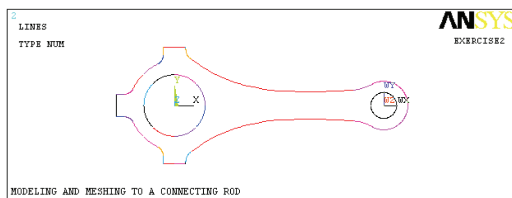


图 2-43 生成的线段结果显示

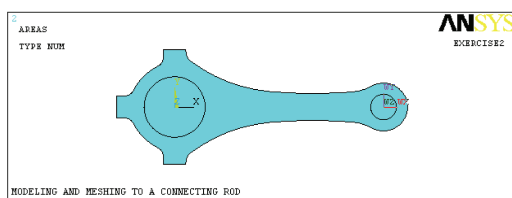


图 2-44 面生成结果显示

36）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 AREA Area number 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

37）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas 命令，出现 Subtract Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

38）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，如图 2-45 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

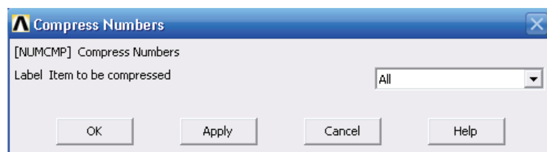


图 2-45 压缩实体编号对话框



提示：压缩所有实体编号，例如在一系列操作之后，线段编号可能为 L1，L2，L4，L6，L7，L9…，进行此步操作之后，线段编号将恢复为 L1，L2，L3，L4，L5，L6，L7…。

39）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成的连杆平面模型，如图 2-46 所示。

40）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal 命令，出现 Extrude Areas by 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Extrude Area along Normal 对话框，在 NAREA Area to be extruded 输入栏中输入 1，在 DIST Length of extrusion 输入栏中输入 50，如图 2-47 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

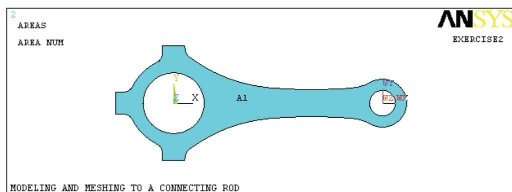


图 2-46 连杆平面模型显示

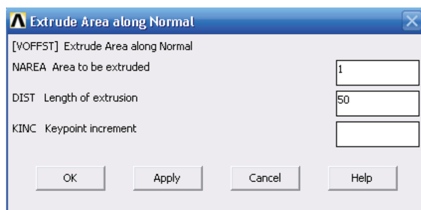


图 2-47 沿法向拖拉面对话框

41）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置视图显示方向。

42）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成的连杆几何模型，如图 2-48 所示。

43）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4．划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool 命令，出现 MeshTool 对话框。选择 Smart Size 选项，其他选项采用默认设置，单击 Mesh 按钮，出现 Mesh Volume 菜单。在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，ANSYS 将对连杆模型进行网格划分，网格划分后的连杆有限元模型如图 2-49 所示。

提示：进行智能网格划分，划分等级默认为 6。

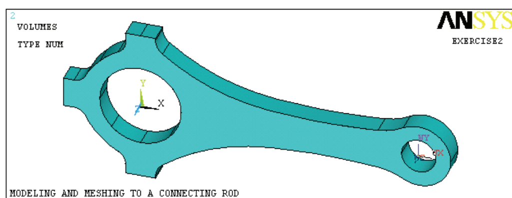


图 2-48 生成的连杆几何模型结果显示

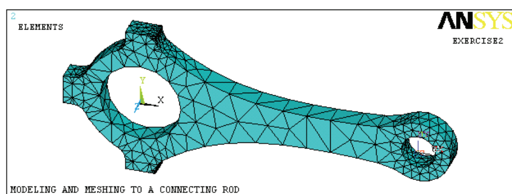


图 2-49 网格划分结果显示

2）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-3.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可通过调整智能网格划分等级进行网格疏密的控制，也可尝试一下自由网格划分。

2.3.4 命令流

```
/FILENAME，EXERCISE2                    ！定义工作文件名
/TITLE，MODELING AND MESHING TO A CONNECTING ROD
                                        ！定义工作标题
/PREP7                                  ！进入前处理器
ET，1，SOLID185                         ！定义单元类型
/PNUM，KP，1                            ！显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                          ！显示线编号
K，1，-180，0，0                        ！创建关键点
K，2，-180，35，0
K，3，-135，35，0
L，1，2                                 ！由点生成线
L，2，3
LPLOT
CSYS，1                                 ！将当前坐标系转变为柱坐标系
K，4，135，135，0
K，5，95，180，0
K，6，95，135，0
L，3，4
L，5，6
LFILLT，2，3，30                        ！两直线倒角
LPLOT
WPROTA，45                              ！顺时针旋转工作平面
CSYS，4                                 ！将当前坐标系转变为工作平面
ALLSEL                                  ！选择所有实体
LSYMM，X，ALL                           ！通过 X 轴映射所有线段
WPROTA，-45                             ！逆时针旋转工作平面
WPOFFS，600                             ！沿 X 轴平移工作平面
CSWPLA，11，1                           ！创建局部坐标系
K，16，75，0，0
K，17，75，135，0
K，18，40，0，0
K，19，40，180，0
L，16，17
L，18，19
CSYS，0                                 ！将当前坐标系转变为直角坐标系
LSEL，S，，，4，6，2                     ！选择线段
LSEL，A，，，7，9，2
LSYMM，X，ALL
```

```
K，27，250，55，0
K，28，520，45，0
BSPLIN，17，28，27，24                   ！生成样条曲线
ALLSEL
LPLOT
LFILLT，15，17，40
LFILLT，11，17，150
ALLSEL
LPLOT
LSYMM，Y，ALL                            ！通过 Y 轴映射所有线段
ALLSEL
NUMMRG，KP                               ！合并关键点
LPLOT
SAVE
LSEL，S,，，12，31，19
AL，ALL                                  ！由线生成面
LSEL，S,，，4，9，5                      ！选择线
LSEL，A,，，13，16，3
LSEL，A,，，23，28，5
LSEL，A,，，32，35，3
AL，ALL
ALLSEL
LSEL，U,，，12，31，19
LSEL，U,，，4，9，5
LSEL，U,，，13，16，3
LSEL，U,，，23，28，5
LSEL，U,，，32，35，3
AL，ALL
APLOT                                    ！显示面
/PNUM，AREA，1
/PNUM，LINE，0
/PNUM，KP，0
/REPLOT
ASBA，3，1                               ！面相减操作
ASBA，4，2
NUMCMP，ALL                              ！压缩实体编号
APLOT
VOFFST，1，50                            ！拖拉面生成体
/VIEW，1，1，2，3
VPLOT                                    ！显示体
ALLSEL
SAVE

SMRT，6                                  ！指定智能网格划分等级
MSHAPE，1，3D                            ！指定单元形状
MSHKEY，0
VMESH，1                                 ！对体进行划分网格
SAVE
FINISH
/EXIT，ALL                               ！退出 ANSYS
```

2.4 自顶向下建模方法实例详解

2.4.1 问题描述

图 2-50 所示为一支座，试采用自顶向下的建模方法建立其几何模型并划分网格（图示长度单位为 mm）。

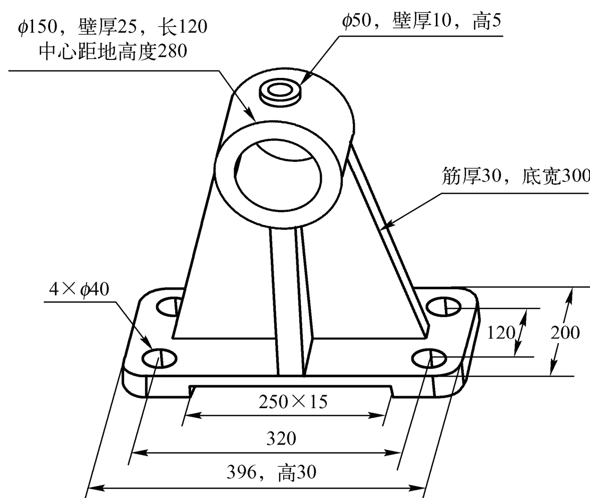


图 2-50 支座结构示意图

2.4.2 问题分析

采用自顶向下的建模方法，即采用 3D 体素建立支座的几何模型并选择 SOLID186 单元划分网格。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SOLID92 单元。

2.4.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在［/TITLE］ Enter new title 输入栏中输入 MODELING AND MESHING TO AN ABUTMENT，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element



Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 20node 186，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

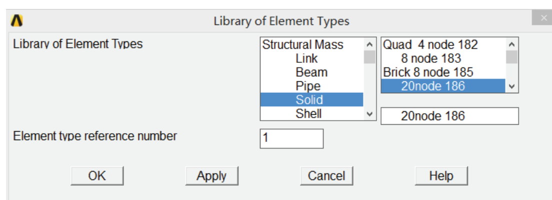


图 2-51　单元类型列表对话框

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．创建几何模型

1）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Style｜Colors｜Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色转变为白色。

2）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜View Settings｜Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

技巧：可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

3）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜View Settings｜Angle of Rotation 命令，出现 Angle of Rotation 对话框，在 THETA　Angle in degrees 输入栏中输入-90，在 Axis　Axis of rotation 下拉菜单中选择 Global Cartes X，其余选项采用默认设置，如图 2-52 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 VOLU　Volume number 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示体编号。

5）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Volumes｜Block｜By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2 输入栏中输入-100，100，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中输入-198，198，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中输入 0，30，如图 2-53 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

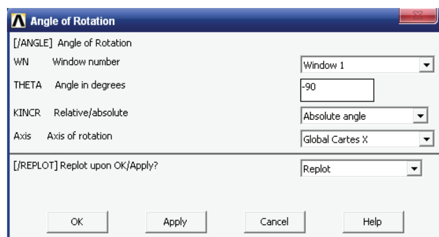


图 2-52　旋转角度设置对话框

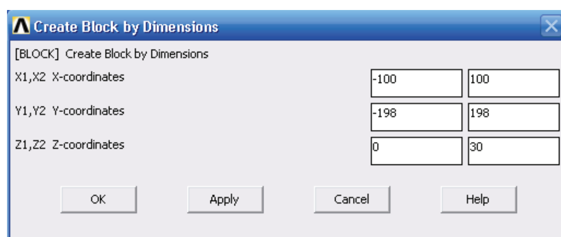


图 2-53　创建块体对话框

6）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口显示如图 2-54 所示的生成块体的结果。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中输入-100，100，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中输入-125，125，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中输入 0，15，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes 命令，出现 Subtract Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：此操作为布尔体相减操作。

技巧：也可通过鼠标进行拾取，拾取时需将鼠标置于体的中心。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 Volumes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩体编号。

10）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-55 所示的体相减后的结果。

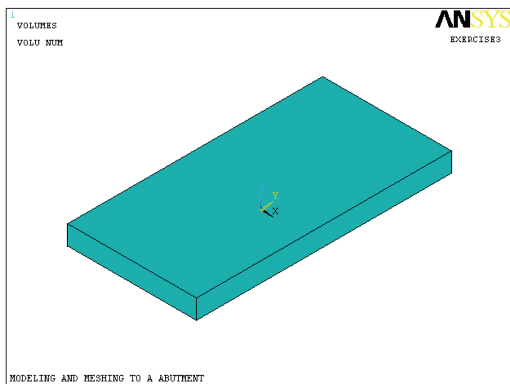


图 2-54 生成的块体结果显示

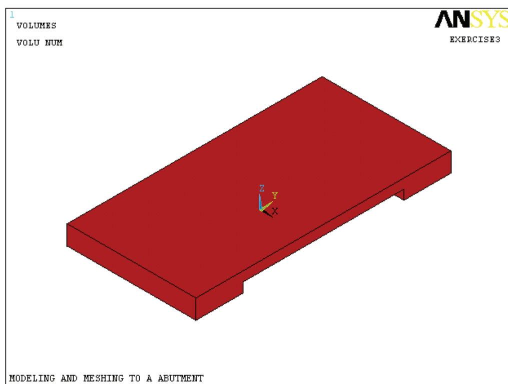


图 2-55 体相减结果显示

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 60，在 WP Y 输入栏中输入 160，在 Rad-1 输入栏中输入 20，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 35，如图 2-56 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：创建小圆柱体。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入-60，在 WP Y 输入栏中输入 160，在 Rad-1 输入栏中输入 20，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 35，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 60，在 WP Y 输入栏中输入-160，在 Rad-1 输入栏中输入 20，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 35，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入-60，在 WP Y 输入栏中输入-160，在 Rad-1 输入栏中输入 20，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 35，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口显示如图 2-57 所示生成圆柱体的结果。

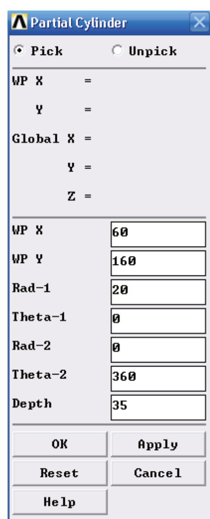


图 2-56　创建圆柱体对话框

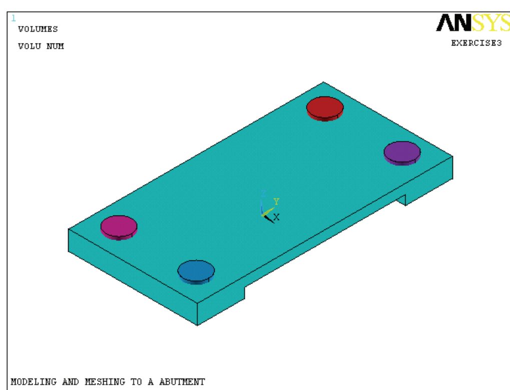


图 2-57　生成圆柱体结果显示

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes 命令，出现 Subtract Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 2，3，4，5，单击 OK 按钮关闭该菜单。

17）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口显示体相减后的结果。

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label　Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，如图 2-58 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 51，在 X,Y,Z　Location in active CS 后面的 3 个输入栏中依次输入−15、−150、30，

单击 OK 按钮关闭该对话框。

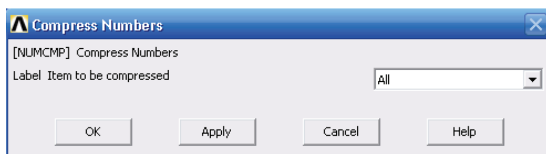


图 2-58 压缩实体编号对话框

20）参照上一步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

52（15，−150，30）； 53（−15，150，30）；
54（15，150，30）； 55（−15，75，280）；
56（15，75，280）； 57（−15，−75，280）；
58（15，−75，280）

21）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Keypoints，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，如图 2-59 所示，单击 OK 按钮，出现 Select Keypoints 拾取菜单，在第 4 栏中选择 Min,Max,Inc，在输入栏中输入 51，58，如图 2-60 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

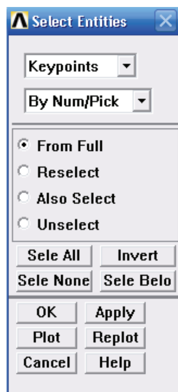


图 2-59 选择实体对话框

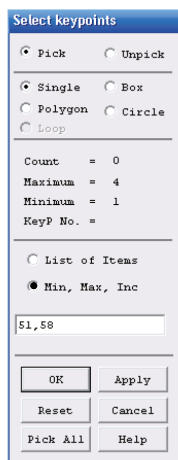


图 2-60 选择关键点拾取菜单

22）选择 Utility Menu | Plot | Keypoints | Keypoints 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成的关键点结果，如图 2-61 所示。

23）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Arbitrary | Through Kps 命令，出现 Create Volumes th 拾取菜单，在输入栏中输入 52，51，53，54，58，57，55，56 的关键点，单击 OK 按钮关闭该菜单。

注意：需按照上述顺序依次输入。

24）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

25）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示生成体的结果，

如图 2-62 所示。

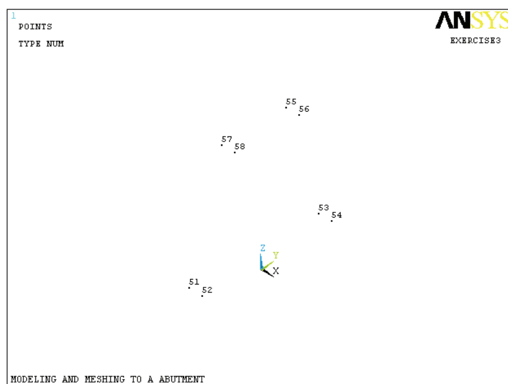


图 2-61 生成的关键点结果显示

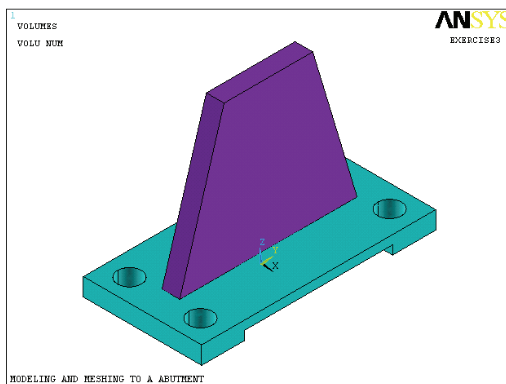


图 2-62 生成体结果显示

26）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 X,Y,Z Offsets 输入栏中输入 60，0，280，单击 OK 按钮关闭该对话框。

27）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前激活坐标系转变为柱坐标系。

提示：以下操作将在柱坐标系中进行。

28）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 XY,YZ,ZX Angles 输入栏中输入 90，90，180，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作为平移工作平面。

29）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 0，在 Rad-1 输入栏中输入 75，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 120，单击 OK 按钮关闭该对话框。

30）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes 命令，出现 Add Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

31）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 Volumes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

32）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-63 所示的体相加后的结果。

33）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

34）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 XY,YZ,ZX Angles 输入栏中输入 90，90，90，单击 OK 按钮关闭该对话框。

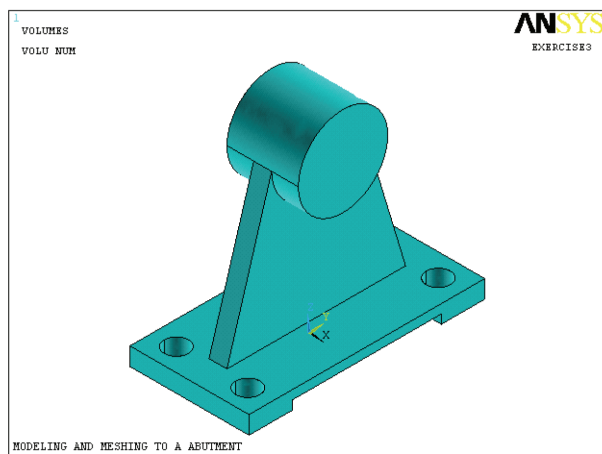


图 2-63 体相加结果显示

35）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 X,Y,Z Offsets 输入栏中输入 0，60，0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

36）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 0，在 Rad-1 输入栏中输入 25，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 80，单击 OK 按钮关闭该对话框。

37）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes 命令，出现 Add Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

38）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 Volumes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

39）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 0，在 Rad-1 输入栏中输入 15，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入 80，单击 OK 按钮关闭该对话框。

40）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes 命令，出现 Subtract Volumes 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择编号为 V1 的体，单击 OK 按钮，再选择编号为 V2 的体，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：V1 为整个体，V2 是刚生成的小圆柱体。

41）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 Volumes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

42）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话框，在 XY,YZ,ZX Angles 输入栏中输入 90，90，90，单击 OK 按钮关闭该对话框。

43）选择 Utility Menu | WorkPlane | Offset WP by Increments 命令，出现 Offset WP 对话

框，在 X,Y,Z Offsets 输入栏中输入 0，0，60，单击 OK 按钮关闭该对话框。

44）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Cylinder | Partial Cylinder 命令，出现 Partial Cylinder 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 0，在 Rad-1 输入栏中输入 50，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0，在 Theta-2 输入栏中输入 360，在 Depth 输入栏中输入-120，单击 OK 按钮关闭该对话框。

45）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Volumes 命令，出现 Subtract Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

46）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩所有实体编号，包括关键点、线段、面及体。

47）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-64 所示的体相减后的结果。

48）选择 Utility Menu | WorkPlane | Align Wp with | Global Cartisian 命令。

49）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS To | Global Cartisian 命令，将当前激活坐标系设置为笛卡儿坐标系。

提示：以下操作将在直角坐标系中进行。

50）参照第 19）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

90（–100，–15，30）；　91（–100，15，30）；
92（100，15，30）；　93（100，–15，30）；
94（–55，–15，220）；　95（–55，15，220）；
96（55，15，220）；　97（55，–15，220）

51）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Arbitrary | Through Kps 命令，出现 Create Volumes th 拾取菜单，在输入栏中输入 90，91，92，93，94，95，96，97，单击 OK 按钮关闭该菜单。

52）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Volumes 命令，出现 Add Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

53）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

54）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-65 所示的体相加后的结果。

55）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

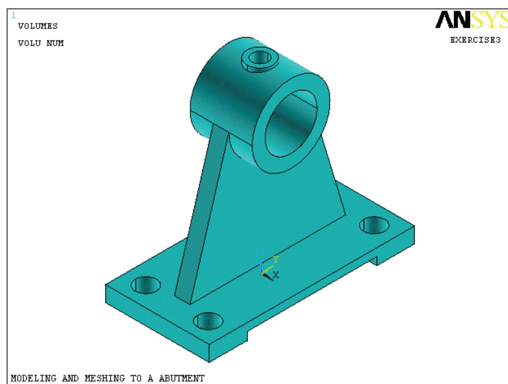


图 2-64 体相减结果显示

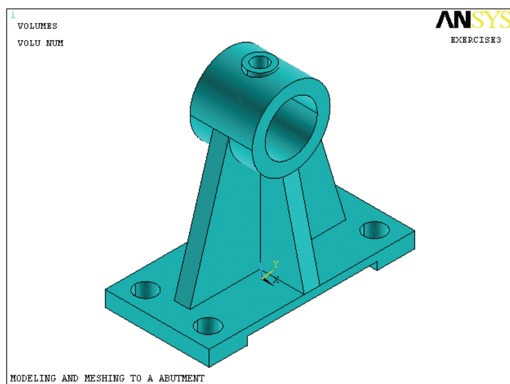


图 2-65 体相加结果显示

56）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Area Fillet 命令，出现 Area Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 4，40，单击 OK 按钮，出现 Area Fillet 对话框，在 NA1,NA2 Intersecting areas 后面的 2 个输入栏中依次输入 4、40，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 30，如图 2-66 所示。

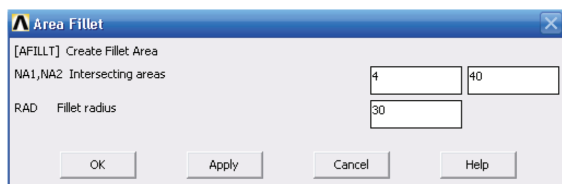


图 2-66 面倒角对话框

57）单击 Apply 按钮，出现 Area Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 3，41，单击 OK 按钮，出现 Area Fillet 对话框，在 NA1,NA2 Intersecting areas 后面的 2 个输入栏中依次输入 3、41，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 30。

58）单击 Apply 按钮，出现 Area Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 4，46，单击 OK 按钮，出现 Area Fillet 对话框，在 NA1,NA2 Intersecting areas 后面的 2 个输入栏中依次输入 4、46，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 30。

59）单击 Apply 按钮，出现 Area Fillet 拾取菜单，在输入栏中输入 44，47，单击 OK 按钮，出现 Area Fillet 对话框，在 NA1,NA2 Intersecting areas 后面的 2 个输入栏中依次输入 44、47，在 RAD Fillet radius 输入栏中输入 30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

60）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Volume by area 命令，出现 Divide Vol by Area 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 40，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：用面分割体，操作完成后若出现 Warning 对话框，可单击其上的 Close 按钮关闭之。

61）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Volume by area 命令，出现 Divide Vol by Area 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，在输入栏

中输入 41，单击 OK 按钮关闭该菜单。

62）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Volume by area 命令，出现 Divide Vol by Area 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 45，单击 OK 按钮关闭该菜单。

63）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Volume by area 命令，出现 Divide Vol by Area 拾取菜单，在输入栏中输入 5，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 46，单击 OK 按钮关闭该菜单。

64）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Volume and Below 命令，出现 Delete Volume 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，3，4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

65）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

66）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

67）选择 Utility Menu | Plot | Volumes 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-67 所示的支座几何模型。

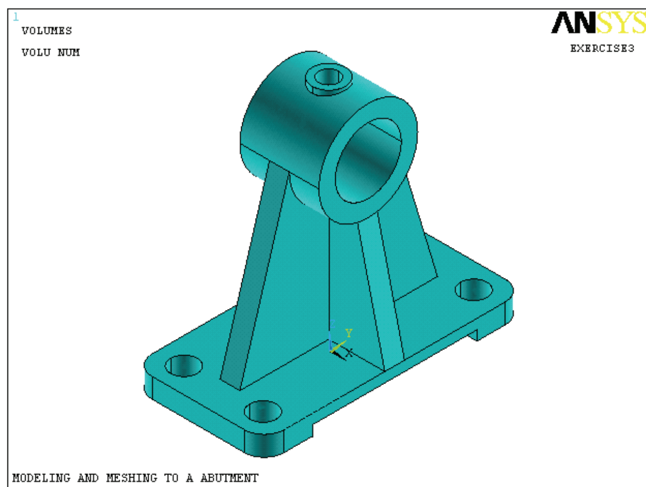


图 2-67　生成的支座几何模型结果显示

68）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-3.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4．划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 VOLU Volume number 选项，使其状态从 On 变为 Off，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 15，如图 2-68 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

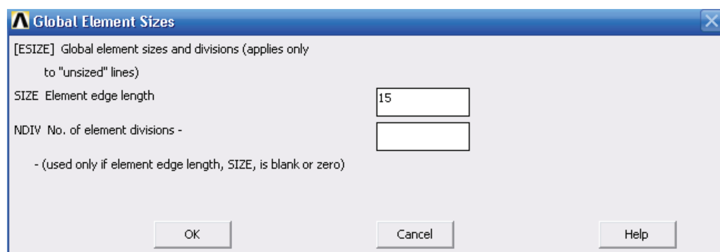


图 2-68 定义单元尺寸对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择支座，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：定义单元尺寸之后进行自由网格划分。

4）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 2-69 所示的支座有限元模型。

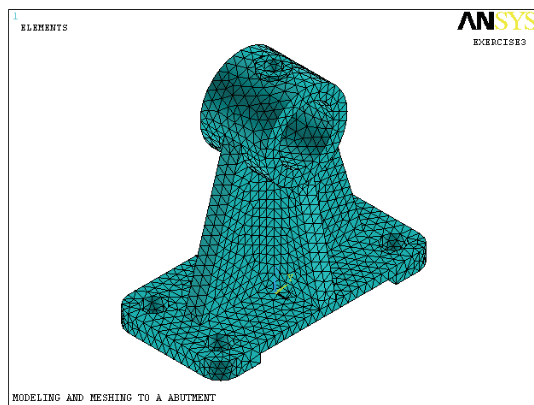


图 2-69 支座有限元模型结果显示

5）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-4.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

试一试：本例主要练习布尔操作，读者可改变模型的几何结构，自行建模，进一步熟悉布尔操作及 ANSYS 的基本操作。

2.4.4 命令流

```
/FILENAME，EXERCISE3                                  ！定义工作文件名
/TITLE，MODELING AND MESHING TO AN ABUTMENT
                                                      ！定义工作标题
/PREP7                                                ！进入前处理器
ET，1，SOLID186                                       ！定义单元类型
/VIEW，1，1，1，1                                     ！设置视图显示方向
/ANG，1
```

```
/ANGLE，1，-90，XM，0                               ！设置视图显示角度
/REPLOT
/PNUM，VOLU，1

BLOCK，-100，100，-198，198，0，30                   ！生成矩形块
BLOCK，-100，100，-125，125，0，15
VSBV，1，2                                          ！体相减操作
NUMCMP，VOLU
VPLOT
CYL4，60，160，20，，0，360，35                      ！生成圆柱体
CYL4，-60，160，20，，0，360，35
CYL4，60，-160，20，，0，360，35
CYL4，-60，-160，20，，0，360，35
VPLOT                                               ！显示体
VSBV，1，2
VSBV，6，3
VSBV，1，4
VSBV，2，5
NUMCMP，ALL
VPLOT
K，51，-15，-150，30                                 ！生成关键点
K，52，15，-150，30
K，53，-15，150，30
K，54，15，150，30
K，55，-15，75，280
K，56，15，75，280
K，57，-15，-75，280
K，58，15，-75，280
KSEL，S，，，51，58                                  ！选择关键点
/PNUM，KP，1                                        ！显示关键点编号
KPLOT                                               ！显示关键点
V，52，51，53，54，58，57，55，56                    ！通过关键点生成体
ALLSEL                                              ！选择所有实体
VPLOT
WPOFFS，60，0，280                                   ！平移工作平面
CSYS，1                                             ！将当前坐标系转变为柱坐标系
WPROTA，90，90，180                                  ！旋转工作平面
CYL4，，，，，75，360，120
VADD，ALL                                           ！体相加操作
NUMCMP，VOLU                                        ！压缩体编号
VPLOT
SAVE

WPROTA，90，90，90
WPOFFS，0，60，0
CYL4，，，，，25，360，80
VADD，ALL                                           ！体相加操作
NUMCMP，VOLU
CYL4，，，，，15，360，80
VSBV，1，2                                          ！体相减操作
```



```
NUMCMP，VOLU
WPROTA，90，90，90                         ！旋转工作平面
WPOFFS，0，0，60                           ！平移工作平面
CYL4,,,,，50，360，-120
VSBV，1，2                                 ！体相减操作
NUMCMP，ALL
VPLOT
WPCSYS，-1，0                              ！将工作平面与当前激活坐标系重合
CSYS，0                                    ！将当前坐标系转变为笛卡儿坐标系
K，90，-100，-15，30                       ！生成关键点
K，91，-100，15，30
K，92，100，15，30
K，93，100，-15，30
K，94，-55，-15，220
K，95，-55，15，220
K，96，55，15，220
K，97，55，-15，220
V，90，91，92，93，94，95，96，97           ！通过关键点生成体
VADD，ALL                                  ！体相加操作
NUMCMP，ALL
VPLOT
SAVE

AFILLT，4，40，30                          ！面倒角
AFILLT，3，41，30
AFILLT，4，46，30
AFILLT，44，47，30
VSBA，1，40                                ！由面分割体
VSBA，3，41
VSBA，4，45
VSBA，5，46
VDELE，1，4，1，1                          ！删除体
ALLSEL
NUMCMP，ALL
VPLOT
SAVE

ESIZE，15                                  ！定义单元尺寸大小
MSHAPE，1，3D                              ！指定单元形状
MSHKEY，0
VMESH，ALL                                 ！对体划分网格
EPLOT                                      ！显示单元
SAVE
FINISH
/EXIT，ALL                                 ！退出 ANSYS
```

第 3 章　ANSYS 16.1 结构线性静力分析及实例详解

本章导读：

本章主要介绍各种类型的结构线性静力分析的工程应用实例，包括平面应力问题、平面应变问题、轴对称问题、梁分析问题、桁架分析问题、壳分析问题以及接触分析问题的求解，通过对各种实例进行具体、详细的分析求解，不仅使读者熟悉求解结构线性静力学问题的基本方法和基本步骤，同时也为读者提供了大量的工程结构静力学问题的求解思路。

3.1　结构线性静力分析基本过程

3.1.1　结构静力分析介绍

ANSYS 程序中的结构静力分析是用来计算在固定不变的载荷作用下结构的响应，即由于稳态外载引起的系统或部件的位移、应力、应变和力。同时，结构静力分析还可以计算那些固定不变的惯性载荷以及那些可以近似等价为静力作用的随时间变化的载荷对结构的影响。

在结构静力分析过程中，一般都假定载荷和响应固定不变，或假定载荷和结构的响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括：

- 外部载荷
- 稳态的惯性力
- 位移载荷
- 温度载荷

3.1.2　结构线性静力分析基本步骤

ANSYS 进行结构线性静力分析有以下主要步骤：

- 建立有限元模型
- 施加载荷和边界条件，进行求解
- 结果评价和分析

下面对结构线性静力分析的步骤进行详细阐述。

1．建立有限元模型

在建立有限元模型的过程中，应该首先确立所要进行分析工程的工作文件名、工作标题，并定义单元类型、单元实常数、材料模型及其参数。这些都是 ANSYS 分析问题的常用步骤。在结构线性静力分析过程中，必须注意：可以使用线性或非线性的单元类型；选择的材料模型可以是线性或非线性；各向同性或各向异性；和温度相关或无关，但在选择材料特性时，必须遵守以下规则：

- 弹性模量 EX 必须定义；
- 若结构需要施加惯性载荷，必须定义能求出质量的参数，如密度 DENS；
- 若进行热-结构耦合分析，必须定义线膨胀系数 ALPX。

2．加载求解

包括以下子步骤：定义分析类型和分析选项、施加载荷、定义边界条件、设置输出格式、进行求解计算。

（1）进入求解器

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

（2）定义分析类型和分析选项

在结构静力分析中，ANSYS 提供的分析类型和分析选项见表 3-1。

表 3-1 分析类型和分析选项

选 项	命 令	GUI 途径
Analysis Type：Static	ANTYPE	Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Restart Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis Main Menu | Solution | Analysis Type | Restart Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic
Large Deformation Effects	NLGEOM	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic
Stress Stiffening Effects	SSTIF	Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options
Prestress Effects Calculation	PSTRES	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic
New-Raphson Option	NROPT	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options
Mass Matrix Formution	LUMPM	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | New Analysis Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis
Equation Solver	EQSLV	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Sol'n Options Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Sol'n Options

● Analysis Type（ANTYPE）

此选项用于指定分析类型，选择 Static（静态）或 Steady-Static（稳态）。

● Large Deformation Effects（NLGEOM）

此选项为大变形或大应变选项，并不是所有的非线性分析都产生大变形，如果分析中存在很大的挠度变形或大应变时，应选择 ON，若不产生大变形，则选择 OFF。程序默认值为 OFF。

● Stress Stiffening Effects（SSTIF）：

应力刚化效应选项，一般只在下列两种情况下使用此选项：

① 在小变形分析中，希望通过应力明显提高或降低结构中的刚度。例如，受正压力作用的薄圆壳问题；

② 在大变形中，希望通过应力刚化提高收敛精度。

程序默认值一般为 OFF，但当 NLGEOM 和 SOLCONTROL 打开时，程序默认值为 ON。

注意：在 ANSYS 16.1 中，该命令已被 PSTRES 命令取代。

● Prestress Effects Calculation（PSTRES）

通过此选项可以在同一模型上施加预应力分析，程序默认值为 OFF。

注意：应力刚化选项和预应力计算选项不能同时在分析中使用，如果在同一分析中同时使用了这两个选项，后者将覆盖前者。

● New-Raphson Option（NROPT）

牛顿-拉普森选项，此选项仅应用于非线性分析，将在以后的章节中进行介绍。

● Mass Matrix Formution（LUMPM）

质量矩阵方程，如果要在结构上施加惯性载荷，可以使用此选项。在使用过程中可以选择程序默认值，该默认值依赖于所选单元的类型。该选项在动态分析过程中比较重要。

● Equation Solver（EQSLV）

方程求解器选项，可以使用下列求解器中的任何一个：

Sparse（SPAR）direct equation solver

Jacobi Conjugate Gradient（JCG） iterative equation solver

Incomplete Cholesky Conjugate Gradient（ICCG） iterative equation solver

Quasi-Minimal Residual （QMR） iterative equation solver

Preconditioned Conjugate Gradient（PCG） iterative equation solver

（3）施加载荷

可以在实体（关键点、线、面）上施加载荷，也可以在有限元模型（节点、单元）上施加载荷。表 3-2 列出了结构静力分析中可以施加的载荷。

表 3-2 静力分析中可施加的载荷

载荷类型	命令	GUI 途径
位移约束（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）	D	Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement

（续）

载 荷 类 型	命 令	GUI 途径
力和力矩 （FX，FY，FZ，MX，MY，MZ）	F	Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment
表面载荷 （PRES）	SF	Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure
温度载荷 （TEMP，FLUE）	BF	Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Temperature Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Temperature
惯性载荷 （重力，旋转惯性力）	ACEL OMEGA DOMEGA	Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Inertia Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Inertia

- 载荷类型
  - 位移（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）

位移约束为自由度约束，通常在模型的边界上施加位移约束，此外，位移也可以表征对称的边界条件和已知的运动点，标定方向由节点的坐标决定。

  - 集中力和力矩（FX，FY，FZ，MX，MY，MZ）

集中力和力矩作为集中载荷，通常在模型的外部施加，其方向由节点的坐标决定。

  - 表面载荷（PRES）

作为表面载荷，一般施加于模型的外部，其正方向为指向单元的表面。

  - 温度载荷（TEMP）

温度载荷是为了研究热膨胀和热收缩时需要施加的一种载荷。如果需要计算热应力，则必须定义热膨胀系数。温度载荷可以直接通过 BF 命令指定，也可以通过 LDREAD 命令读入。

  - 能量密度（FLUE）

在研究材料由于中子轰击或其他原因而发生膨胀现象以及材料的蠕变现象时，需要施加能量密度载荷，但能量密度值的输入必须建立在膨胀和蠕变方程定义的基础之上。

  - 重力、旋转惯性力

在定义重力、旋转力等惯性载荷时，必须给定密度或者能够求出材料质量的参数。

- 施加载荷的方式

在程序分析中，载荷可以被施加、删除、进行运算以及列表显示。对于所有的载荷操作，既可以通过命令或者 GUI 的方式进行，也可以通过定义参数数组表格的方式进行。

（4）存储文件

Command：SAVE

GUI：Utility Menu｜File｜Save As

（5）开始求解计算

Command：SOLVE

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS

（6）退出求解器

Command：FINISH

GUI：Main Menu｜Finish

3．查看求解结果

在结构静力分析中，其计算结果将被写入到结果文件 Jobname.RST 中，该结果文件中包含了以下数据。

- 基本数据：节点位移信息（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）。
- 导出数据：包括节点和单元应力、节点和单元应变、单元集中力和节点支反力等。

在结果的检查中，可以使用通用后处理器 POST1，也可以使用时间历程后处理器 POST26。POST1 后处理器可以检查整个模型在指定时间步下的计算结果；而 POST26 主要用于非线性分析中特定加载历史下的结果跟踪。

3.2 平面应力问题分析实例详解——带孔薄板内部应力集中分析

3.2.1 问题描述

图 3-1 所示为一中心带有圆孔的薄板，薄板平均厚度为 0.2mm，两端承受均布载荷 P=1000Pa，求解薄板内部的应力场分布。（薄板材料弹性模量为 220GPa，泊松比为 0.3）

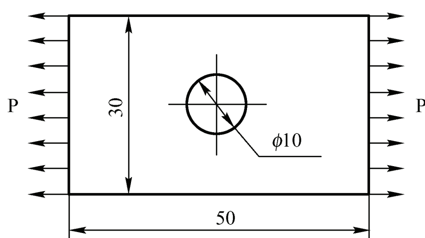


图 3-1　薄板承载示意图

3.2.2 问题分析

对于涉及薄板的结构问题，若只承受薄板长度和宽度方向所构成的平面上的载荷时（厚度方向无载荷），一般沿薄板厚度方向上的应力变化可不予考虑，即该问题可简化为平面应力问题（将单元关键字设置为平面应力属性）。根据平板结构的对称性，选择整体结构的 1/4 建立几何模型，进行分析求解。

如果无法判断某一问题是否为平面应力问题，则需选择 SOLID 实体单元建立空间模型，施加载荷和相应的边界条件进行求解。在本例中，选择 PLANE183 结构单元进行建模求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE82 结构单元。

3.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，并将 New log and error files 设置为 Yes，如图 3-2 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 ANALYSIS OF PLATE STRESS WITH SMALL CIRCLE，如图 3-3 所示，单击 OK 按钮

关闭该对话框。

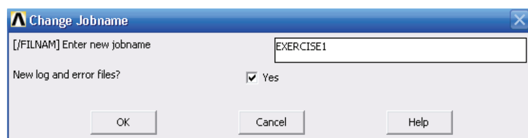


图 3-2 指定工作文件名对话框

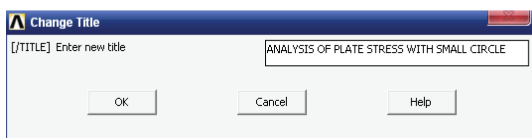


图 3-3 指定工作标题对话框

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 3-4 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

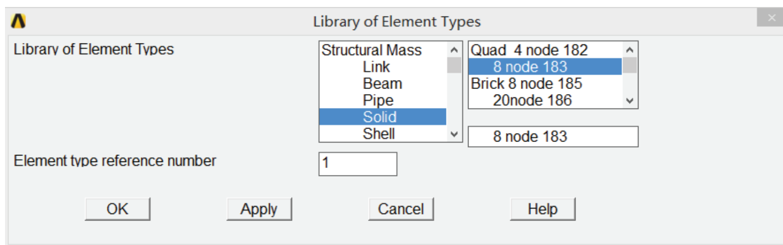


图 3-4 指定单元类型对话框

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 选项，如图 3-5 所示，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，如图 3-6 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 菜单命令，关闭该对话框。

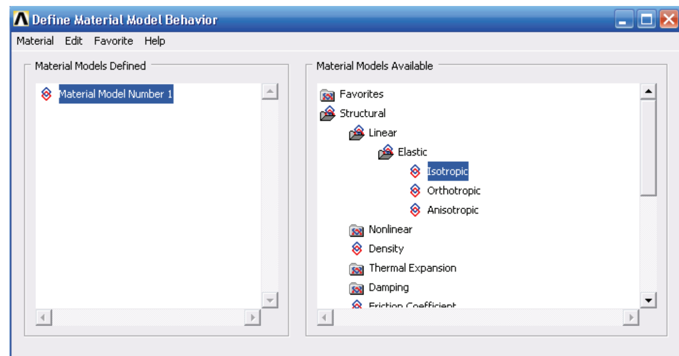


图 3-5 定义材料属性对话框

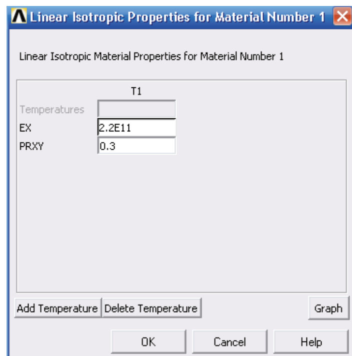


图 3-6 输入材料参数对话框



4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Rectangle｜By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中输入 0，0.025，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中输入 0，0.015，如图 3-7 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Areas｜Circle｜By Dimensions 命令，出现 Circular Area by Dimensions 对话框，在 RAD1 Outer radius 输入栏中输入 0.005，在 RAD2 Optional inner radius 输入栏中输入 0，在 THETA1 Starting angle（degrees）输入栏中输入 0，在 THETA2 Ending angle（degrees）输入栏中输入 90，如图 3-8 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

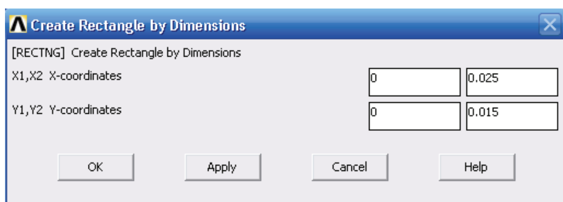


图 3-7 生成矩形面对话框

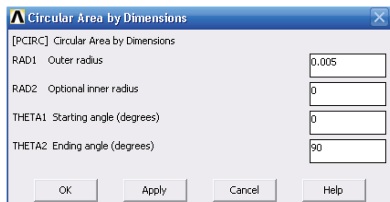


图 3-8 生成四分之一圆面对话框

3）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 AREA Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项均采用默认设置，如图 3-9 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示面编号。

4）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Operate｜Booleans｜Subtract｜Areas 命令，出现 Subtract Areas 拾取菜单，如图 3-10 所示，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

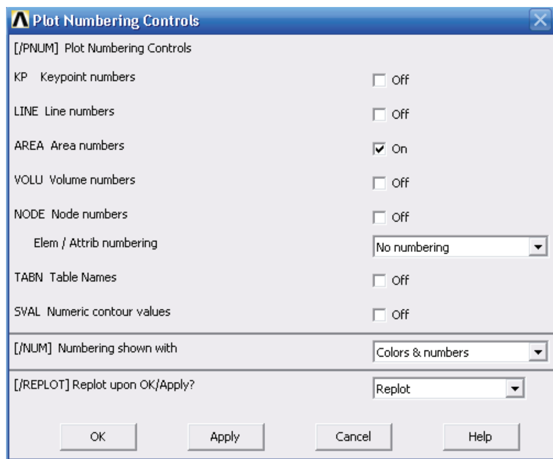


图 3-9 编号显示控制对话框

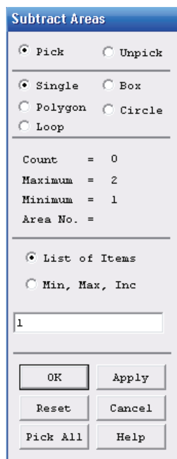


图 3-10 面相减拾取菜单

技巧：也可以通过鼠标拾取相应编号的面。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉选框中选择 All，如图 3-11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

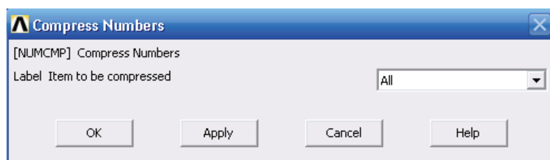


图 3-11 压缩实体编号对话框

提示：压缩实体编号，例如线段编号为 L1、L3、L5、L6、L8，执行该操作之后变为 L1、L2、L3、L4、L5。

6）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色转变为白色。

7）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 GEOMETRIC MODEL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的几何模型，如图 3-12 所示。

9）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP Keypoint numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项均采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点编号。

10）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 0.002，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | By Corners 命令，出现 Map Mesh Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，然后在输入栏中输入 1，4，5，3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 GEOMETRIC MODEL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分后的结果，如图 3-13 所示。

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

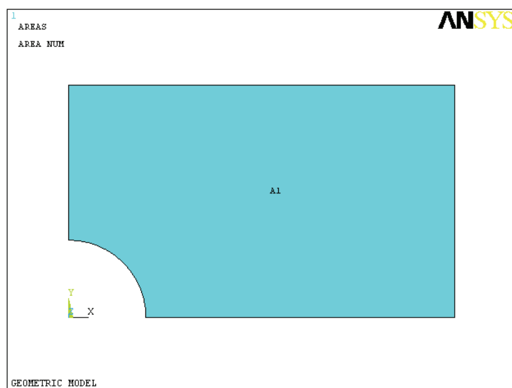


图 3-12　生成的几何模型结果显示

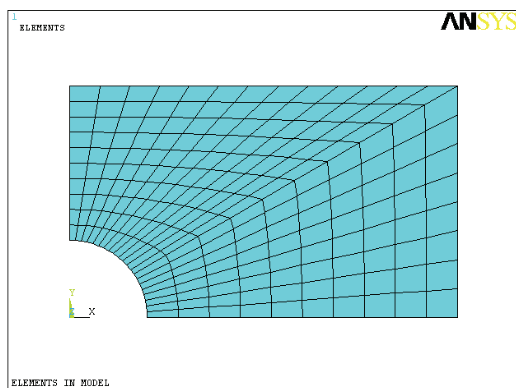


图 3-13　映射网格划分结果显示

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框。选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

3）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，如图 3-14 所示，单击 OK 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，如图 3-15 所示，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择编号为 4 的线段。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框。在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines, all，如图 3-16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择编号为 4 的线段上的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick all 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框。在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 3-17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点 Y 方向上的位移进行约束，即不允许节点有 Y 方向的位移。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select lines 对话框，在输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

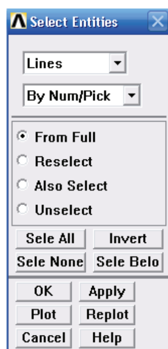


图 3-14 选择实体对话框

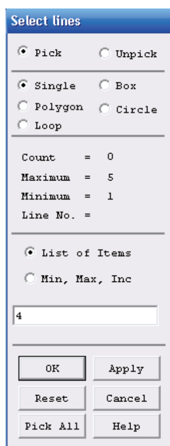


图 3-15 拾取线段菜单

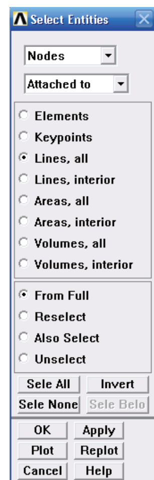


图 3-16 选择实体对话框

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines, all，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick all 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框。在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点 X 方向上的位移进行约束，即不允许节点有 X 方向的位移。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select lines 对话框，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines, all，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick all 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框。在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入-1000，如图 3-18 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

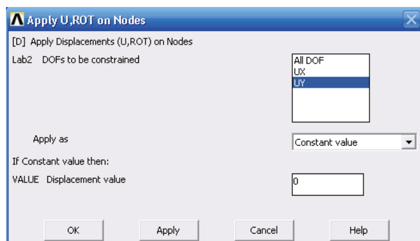


图 3-17 施加位移约束对话框

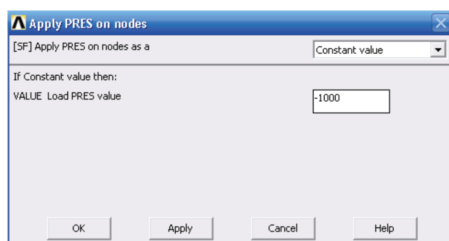


图 3-18 施加压力载荷对话框

提示：输入负值表示模型承受拉应力。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

注意：此步不能省略，否则只会有第 11）步选择的部分节点参与运算。

14）选择 Utility Menu | Plot | Element 命令，加载后的结果如图 3-19 所示。

15）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout 命令，出现 Solution Printout Controls 对话框，在 Item Item for printout control 下拉选框中选择 Basic quantities，在 FREQ Print frequency 选项中选择 Every substep，如图 3-20 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

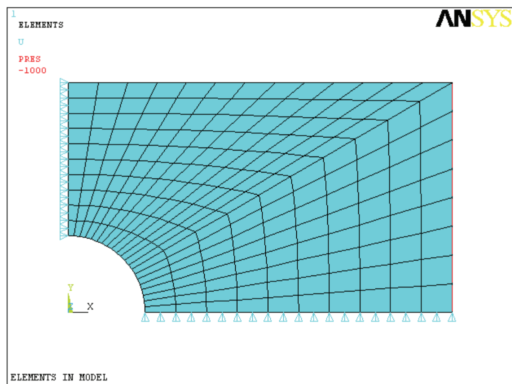


图 3-19　加载后的结果显示

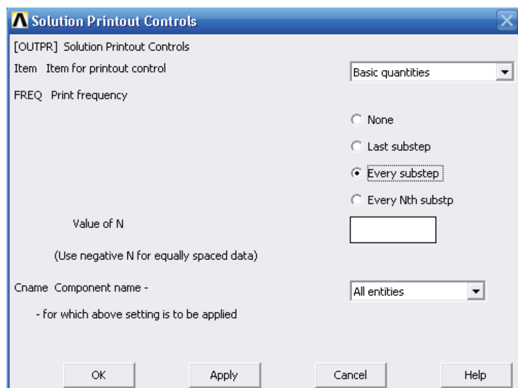


图 3-20　输出控制对话框

17）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

提示：若出现其他对话框，可关闭之。

18）求解结束时，出现 Note 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

19）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+undef edge 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的轮廓，如图 3-21 所示。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 3-22 所示的位移场分布等值线图。

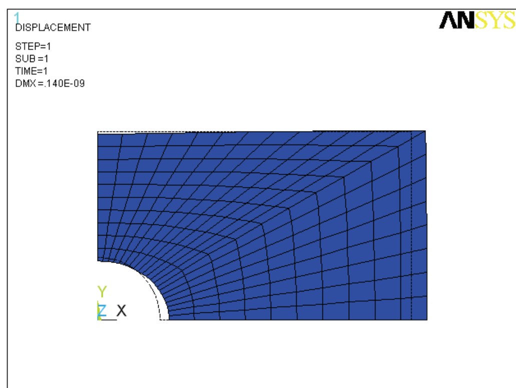


图 3-21　变形后的几何形状和未变形轮廓显示

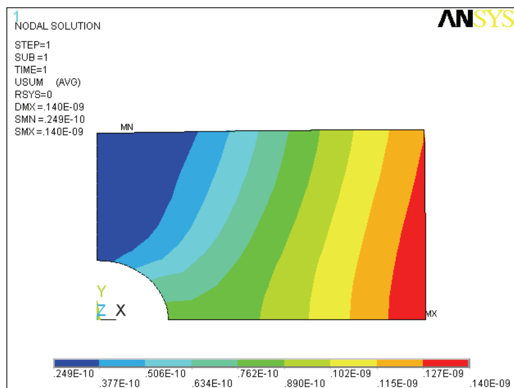


图 3-22　位移场分布等值线图

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 3-23 所示的等效应力场分布等值线图。

4）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Symmetry Expansion | Periodic/Cyclic Symmetry 命令，出现 Periodic/Cyclic Symmetry Expansion 对话框，在 Select type of cyclic symmetry 选项中选择 1/4 Dihedral Sym，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示扩展后结果，如图 3-24 所示。

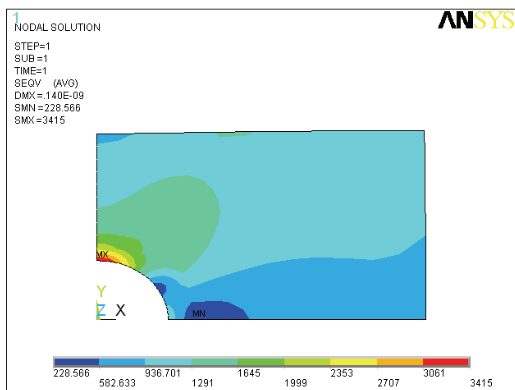


图 3-23　等效应力场分布等值线图

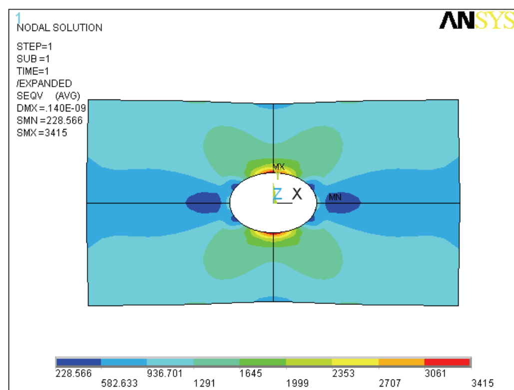


图 3-24　扩展后的结果显示

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：本例根据对称性，仅建立了 1/4 模型。读者可建立整体模型进行求解计算，注意边界条件将会不同，比较两种建模方法的计算结果。

3.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                        ！定义工作文件名
```

```
/TITLE， ANALYSIS OF PLATE STRESS WITH SMALL CIRCLE
！定义工作标题
/PREP7                                   ！进入前处理器
ET，1，PLANE183                          ！选择单元类型
MP，EX，1，2.2E11                         ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                          ！输入泊松比
RECTNG，0，0.025，0，0.015                ！生成矩形面
PCIRC，0.005，0，0，90                    ！生成圆面
/PNUM，AREA，1                            ！显示面编号
APLOT                                    ！显示面
ASBA，1，2                                ！面相减
NUMCMP，ALL                               ！压缩编号
/TITLE，GEOMETRIC MODEL
APLOT
/PNUM，KP，1                              ！显示关键点编号
LPLOT
ESIZE，0.002                              ！设置单元尺寸
AMAP，1，1，4，5，3                        ！映射网格划分
/TITLE，ELEMENTS IN MODEL
EPLOT                                    ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                    ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                            ！指定求解类型
/PNUM，LINE，1                            ！显示线段编号
LPLOT                                    ！显示线段
LSEL，S，LINE，，4                         ！选择线段
NSLL，S，1                                ！选择线段上所有节点
D，ALL，UY                                ！ 施加位移载荷
LSEL，S，LINE，，5
NSLL，S，1
D，ALL，UX
LSEL，S，LINE，，1
NSLL，S，1
SF，ALL，PRES，-1000                       ！施加压力载荷
ALLSEL                                   ！选择所有实体
OUTPR，BASIC，ALL                          ！设置输出格式
SAVE
SOLVE                                    ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                   ！进入后处理器
PLDISP，2                                 ！显示变形形状和未变形轮廓
PLNSOL，U，SUM                             ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，EQV                             ！绘制等效应力等值线图
/EXPAND，4，POLAR，HALF，，90
PLNSOL，S，EQV                             ！绘制等效应变等值线图
```

```
FINISH
/EXIT                                                      ! 退出 ANSYS
```

3.3 平面应变问题分析实例详解——输气管道受力分析

3.3.1 问题描述

图 3-25 所示为一天然气输送管道的横截面，在其内表面承受气体压力 P 的作用，求管壁的应力场分布。

管道几何参数：

外径 R_1=0.6m；内径 R_2=0.4m；壁厚 t=0.2m

管道材料参数：

弹性模量 E=200GPa；泊松比ν=0.26

载荷：P=1MPa

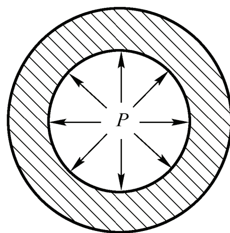


图 3-25 管道受力简图

3.3.2 问题分析

由于管道沿长度方向的尺寸远大于管道的直径，因此在计算过程中忽略管道的端面效应，认为在其长度方向无应变产生，即可将该问题简化为平面应变问题（将单元关键字设置为平面应变属性），选取管道横截面建立几何模型，采用 PLANE183 结构单元进行求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE82 结构单元。

3.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 STRESS ANALYSIS TO A LONG HOLLOW CYLINDER UNDER PRESSURE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE183 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉选框中选择 Plane strain，其余选项采用默认设置，如图 3-26 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

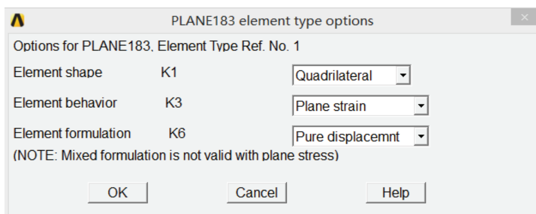


图 3-26　PLANE183 单元属性设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structral、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中执行 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4．生成几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Partial Annulus 命令，出现 Part Annular Circ Area 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 0，在 Rad-1 输入栏中输入 0.4，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 0.6，在 Theta-2 输入栏中输入 90，如图 3-27 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色转变为白色。

3）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，显示所有面。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Areas 命令，出现 Reflect Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Reflect Areas 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 选项中选择 Y-Z plane X，如图 3-28 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

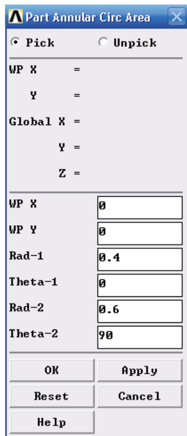


图 3-27　生成部分圆环面对话框

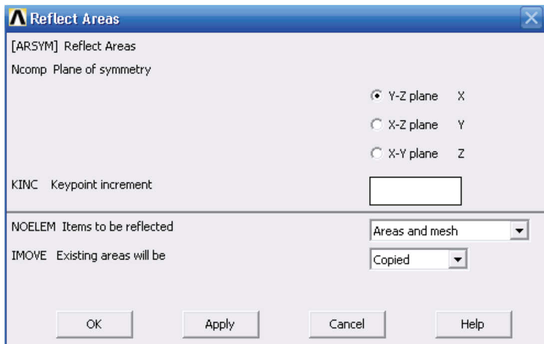


图 3-28　映射面对话框

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Areas 命令，出现 Reflect Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Reflect Areas 对话框，在 Ncomp Plane of symmetry 选项中选择 X-Z plane Y，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label Type of item to be merged 下拉选框中选择 All，如图 3-29 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

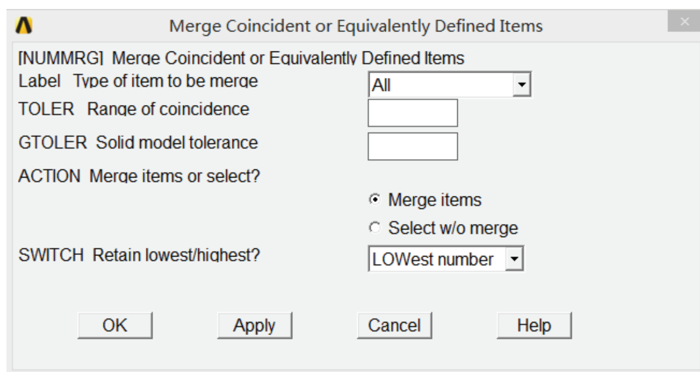


图 3-29 合并同位置实体对话框

提示：合并同位置上重复定义的实体。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩所有实体编号，如在一系列操作之后，线段编号可能为 1，2，4，6，7，9…，进行此步操作之后，线段编号将恢复为 1，2，3，4，5，6…。

8）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的几何模型，如图 3-30 所示。

9）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

10）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前坐标系转变为柱坐标系。

提示：以下操作将在柱坐标系中进行。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，在第 5 栏中选择 From Full，如图 3-31 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

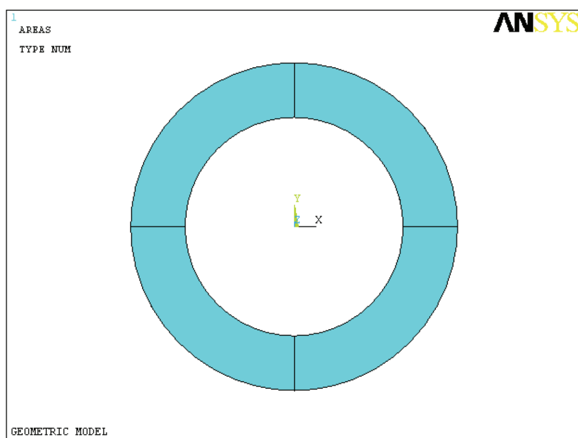


图 3-30　生成的几何模型结果显示

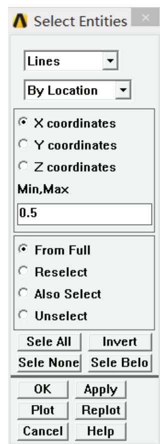


图 3-31　选择实体对话框

提示：选择线段中心点 R 坐标（柱坐标）为 0.5 的所有线段，即 4 条直线段。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 4，如图 3-32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：定义线段单元等分数。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

14）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，在第 5 栏中选择 Unselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择除线段中心点 R 坐标（柱坐标）为 0.5 的线段之外的所有其他线段，即 8 条圆弧线段。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该对话框。

17）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

18）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 3-33 所示。

19）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis

对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

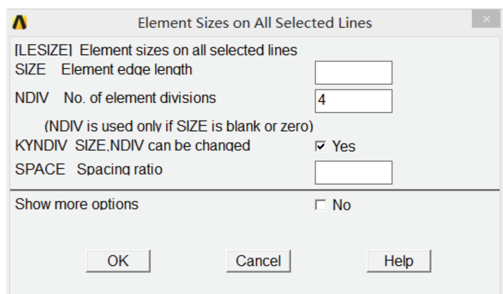


图 3-32 单元尺寸及数量设置对话框

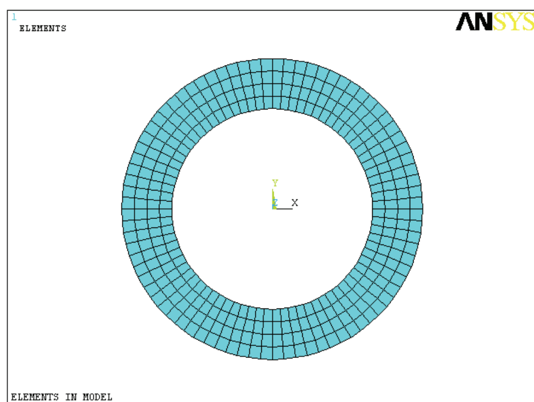


图 3-33 网格划分结果显示

2）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，6，10，12，单击 OK 按钮关闭该菜单。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择编号为 3、6、10、12 的线段上的所有节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，参照图 3-34 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，9，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，参照图 3-35 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，7，单击 OK 按钮关闭该



菜单。

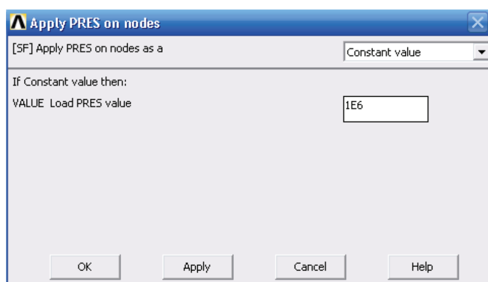


图 3-34 在节点上施加压力载荷对话框

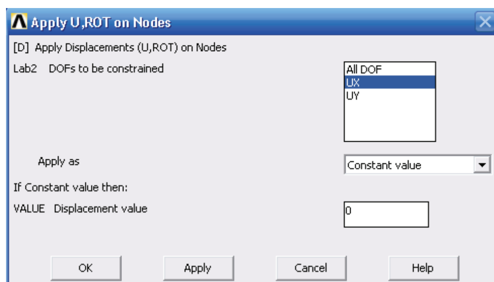


图 3-35 在节点上施加位移约束对话框

10）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Displacement｜On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点 Y 方向的位移进行约束。

12）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

15）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6. 查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF solution｜Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示位移等值线图，如图 3-36 所示。

2）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜Stress｜X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 X 方向应力等值线图，如图 3-37 所示。

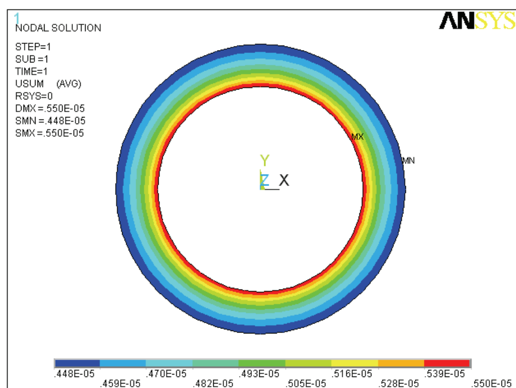


图 3-36 位移等值线图

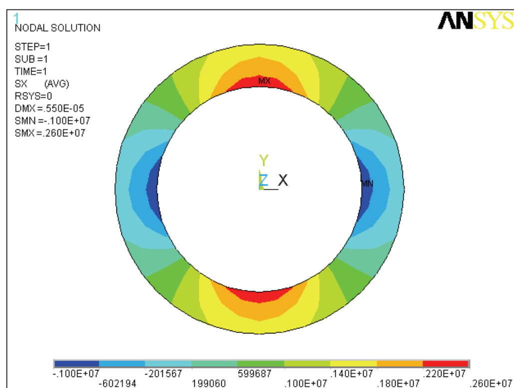


图 3-37 X 方向应力等值线图

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Y 方向应力等值线图，如图 3-38 所示。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示等效应力等值线图，如图 3-39 所示。

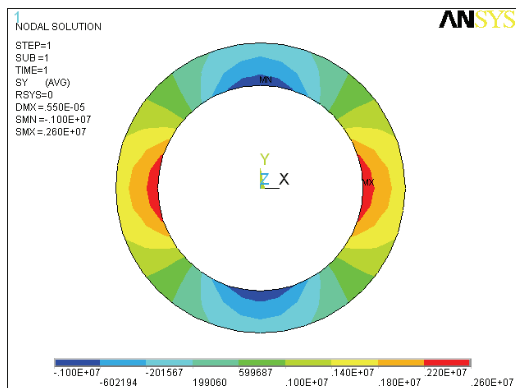


图 3-38 Y 方向应力等值线图

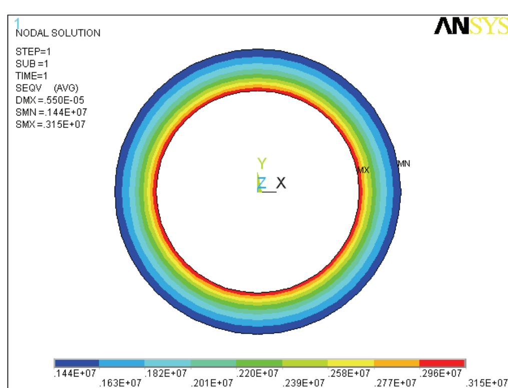


图 3-39 等效应力等值线图

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：本例利用整体模型进行求解计算。读者可尝试建立 1/4 模型，但要注意在两处边界上分别施加对称位移约束，求解结果应和整体模型求解结果一致。

3.3.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE2                              ！定义工作文件名
```

```
/TITLE，STRESS ANALYSIS TO A LONG HOLLOW CYLINDER UNDER PRESSURE
                                                    ！定义工作标题
/PREP7                                              ！进入前处理器
MP，EX，1，2E11                                     ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.26                                   ！输入泊松比
ET，1，PLANE183                                     ！定义单元类型
KEYOPT，1，3，2                                     ！设置单元关键字
CYL4，，，0.4，0，0.6，90                           ！生成圆环面
APLOT                                               ！显示面
ARSYM，X，1                                         ！沿 X 轴映射面
ARSYM，Y，1，2                                      ！沿 Y 轴映射面
NUMMRG，ALL                                         ！合并实体
NUMCMP，ALL                                         ！压缩实体编号
/TITLE，GEOMETRIC MODEL
APLOT
/PNUM，LINE，1                                      ！显示线段编号
LPLOT                                               ！显示线段
CSYS，1                                             ！将坐标系转变为柱坐标系
LSEL，S，LOC，X，0.5                                ！选择线段
LESIZE，ALL，，，4                                  ！设置线段等分数
ALLSEL                                              ！选择所有实体
LSEL，U，LOC，X，0.5
LESIZE，ALL，，，20
AMESH，ALL                                          ！对面进行网格划分
ALLSEL
/TITLE，ELEMENTS IN MODEL
EPLOT                                               ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                               ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                      ！指定分析类型
LPLOT
LSEL，S，，，3，6，3                                ！选择线段
LSEL，A，，，10，12，2
NSLL，S，1                                          ！选择线段上所有节点
SF，ALL，PRES，1E6                                  ！施加压力载荷
LSEL，S，，，2，9，7
NSLL，S，1
D，ALL，UX                                          ！施加位移约束
LSEL，S，，，4，7，3
NSLL，S，1
D，ALL，UY
ALLSEL
SAVE
SOLVE                                               ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                              ！进入后处理器
```

```
PLNSOL，U，SUM                                ！绘制位移等值线图
PLNSOL，S，X                                  ！绘制 X 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                                  ！绘制 Y 方向应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                                ！绘制等效应力等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                                    ！退出 ANSYS
```

3.4 轴对称问题分析实例详解——轴类零件受拉分析

3.4.1 问题描述

图 3-40 为一轴类零件结构示意图，在其两端面施加大小 P=50MPa 的均布载荷，求零件内部各点的应力、应变场分布。

零件材料弹性模量为 220GPa，泊松比为 0.3。

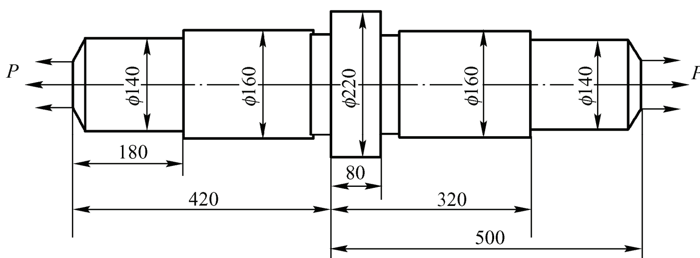


图 3-40 轴类零件结构示意图

3.4.2 问题分析

由于该零件的几何形状、载荷条件以及边界条件都满足轴对称条件，因此可以按照轴对称问题进行求解（将单元关键字设置为轴对称属性），选取零件纵截面的 1/2 建立几何模型。另外，在轴类零件中，为了加工方便或美观要求而设置的凹槽、凸台、过渡圆角及倒角等，在承载过程中对轴的影响很小，在建模过程中一般可以不予考虑。在本例中，选择 PLANE183 结构单元进行建模求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE82 结构单元。

3.4.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 STRESS ANALYSIS TO AN AXES，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE183 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉选框中选择 Axisymmetric，其余选项采用默认设置，如图 3-41 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

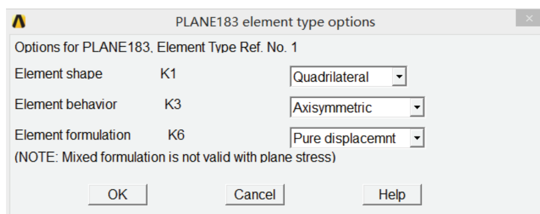


图 3-41 PLANE183 单元属性设置对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structral、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4．生成几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.14，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.18，如图 3-42 所示。

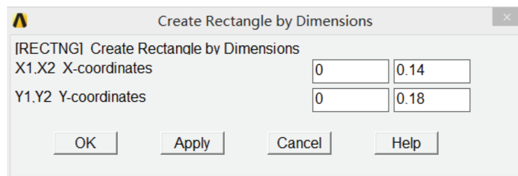


图 3-42 创建矩形面对话框

提示：创建矩形面。

2）单击 Apply 按钮，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.16，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0.18、0.42，单击 Apply 按钮；在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.22，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0.42、0.5，单击 Apply

按钮；在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.16，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0.5、0.74，单击 Apply 按钮；在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.14，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0.74、0.92，单击 OK 按钮关闭该对话框。

注意：每次输入完成之后一定要单击 Apply 按钮确认。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Areas 命令，出现 Add Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

提示：进行面的相加操作。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩布尔操作之后的实体编号。

5）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

6）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-43 所示的几何模型。

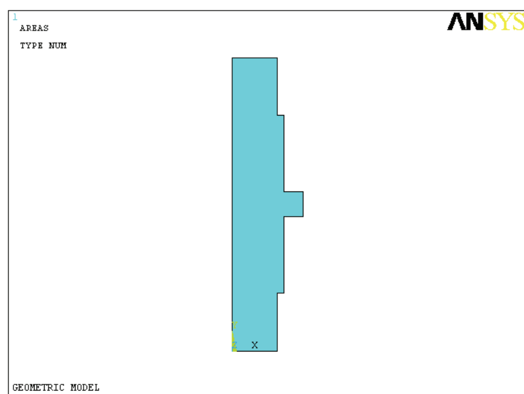


图 3-43 生成的几何模型结果显示

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 Size Element edge length 输入栏中输入 0.02，如图 3-44 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

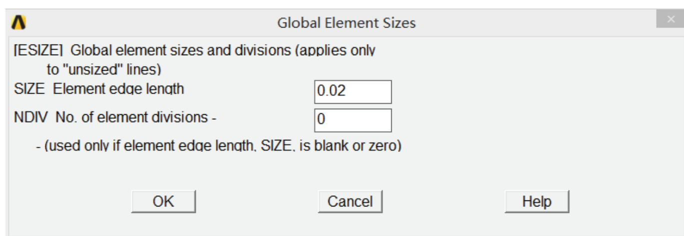


图 3-44 定义单元尺寸对话框

提示：定义单元尺寸。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label Type of item to be merged 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：合并同位置重复定义的实体。

10）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 3-45 所示。

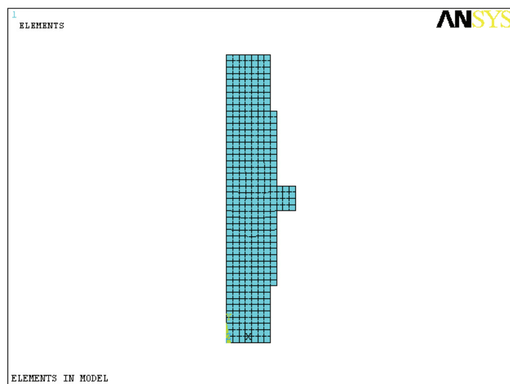


图 3-45 网格划分结果显示

11）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.92，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标为 0.92 的所有节点。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入-50E6，如图 3-46 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

注意：输入负值表示施加拉应力载荷。

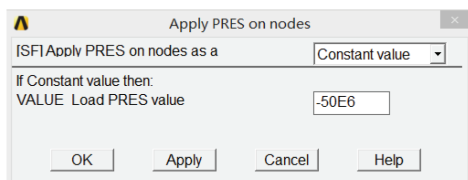


图 3-46 施加均布载荷对话框

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 下拉选框中选择 UX，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 3-47 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

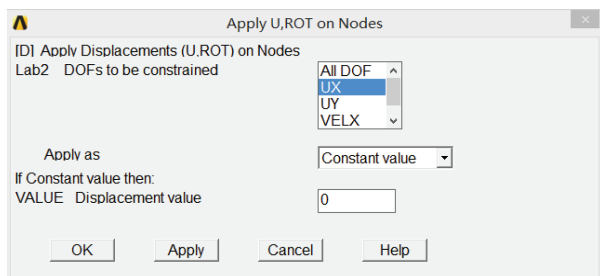


图 3-47 施加位移约束对话框

提示：对所选节点的 X 方向施加 0 位移约束。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 下拉选框中选择 UY，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点的 Y 方向施加 0 位移约束。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

9）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对

话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

11）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Resuls | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，如图 3-48 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 X 方向位移等值线图，如图 3-49a 所示。

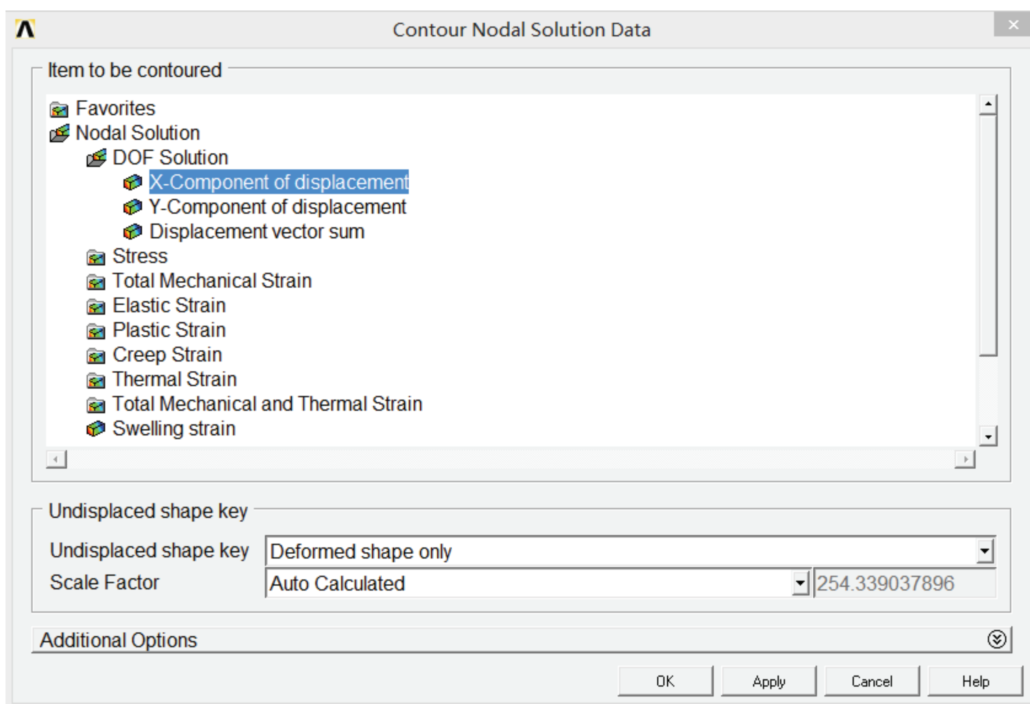
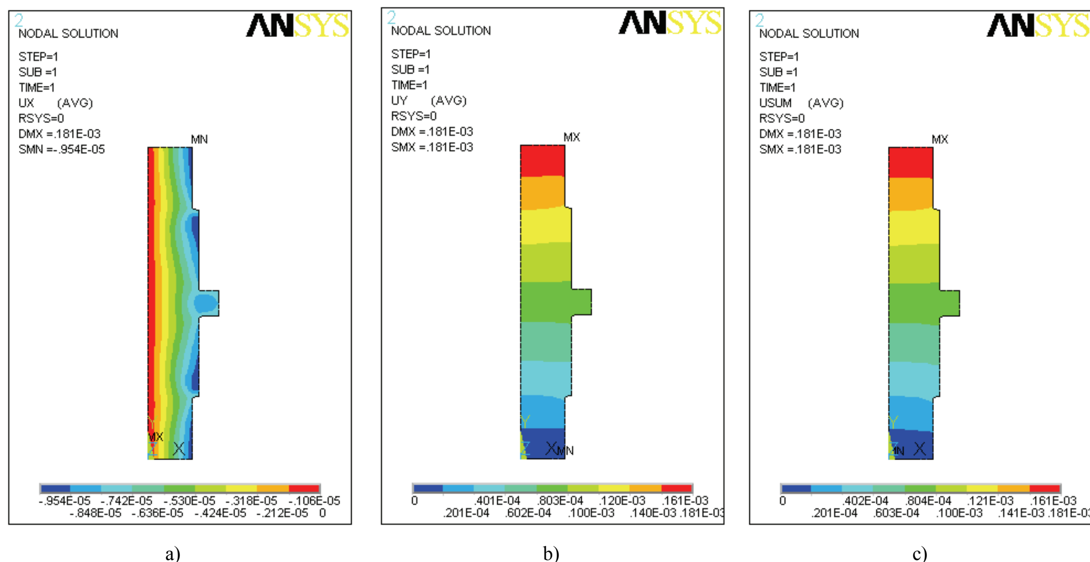


图 3-48　节点求解结果显示对话框

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Y 方向位移等值线图，如图 3-49b 所示。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示合位移等值线图，如图 3-49c 所示。

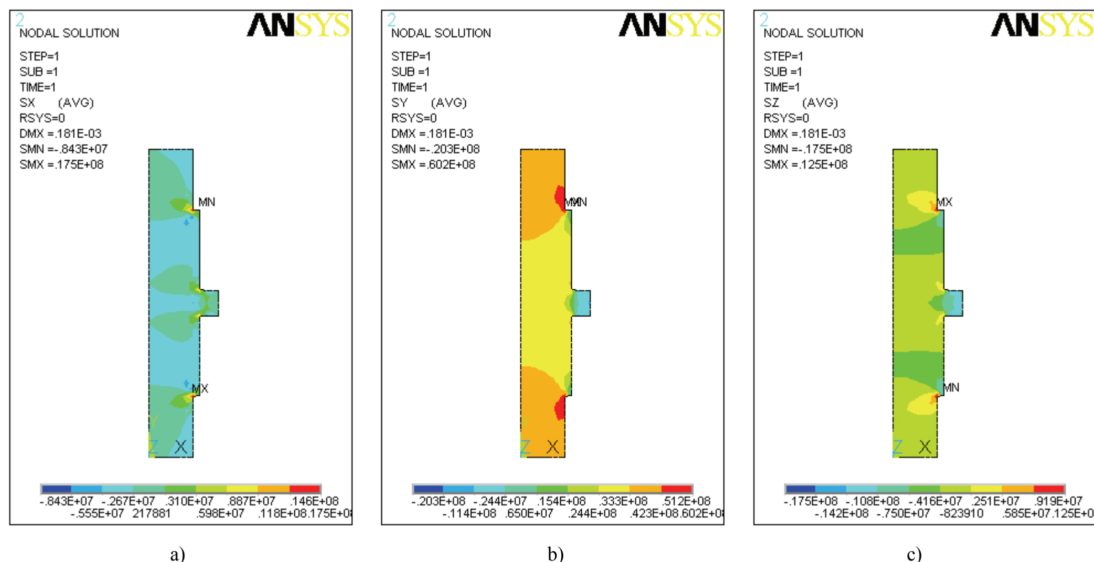


a) b) c)

图 3-49 位移等值线结果显示

a) X 方向位移等值线图 b) Y 方向位移等值线图 c) 合位移等值线图

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 X 方向应力等值线图，如图 3-50a 所示。



a) b) c)

图 3-50 X、Y、Z 方向应力等值线结果显示

a) X 方向应力等值线图 b) Y 方向应力等值线图 c) Z 方向应力等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution

丨Stress丨Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Y 方向应力等值线图，如图 3-50b 所示。

6）选择 Main Menu丨General Postproc丨Plot Results丨Contour Plot丨Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution丨Stress丨Z-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Z 方向应力等值线图，如图 3-50c 所示。

7）选择 Utility Menu丨File丨Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：感兴趣的读者可建立包括倒角等在内的精确有限元模型，求解计算后查看计算结果和本例计算结果的差别。

3.4.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE3                                 ！定义工作文件名
/TITLE，STRESS ANALYSIS TO AN AXES
                                                    ！定义工作标题
/PREP7                                              ！进入前处理器
ET，1，PLANE183                                     ！定义单元类型
KEYOPT，1，3，1                                     ！设置单元关键字
MP，EX，1，2.2E11                                   ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                                    ！输入泊松比
RECTNG，0，0.14，0，0.18                            ！生成矩形面
RECTNG，0，0.16，0.18，0.42
RECTNG，0，0.22，0.42，0.5
RECTNG，0，0.16，0.5，0.74
RECTNG，0，0.14，0.74，0.92
AADD，ALL                                           ！面相加
NUMCMP，ALL                                         ！压缩实体编号
/TITLE，GEOMETRIC MODEL
APLOT                                               ！显示面
ESIZE，0.02                                         ！设置单元尺寸
AMESH，ALL                                          ！对面进行网格划分
NUMMRG，ALL                                         ！合并实体
/TITLE，ELEMENTS IN MODEL
EPLOT                                               ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                               ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                      ！指定分析类型
NSEL，S，LOC，Y，0.92                               ！选择节点
SF，ALL，PRES，-50E6                                ！施加压力载荷
NSEL，S，LOC，X，0
D，ALL，UX                                          ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，Y，0
D，ALL，UY
```

```
ALLSEL                                  ! 选择所有实体
SAVE
SOLVE                                   ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                  ! 进入 POST1 后处理器
PLNSOL，U，X                            ! 绘制 X 方向位移等值线图
PLNSOL，U，Y                            ! 绘制 Y 方向位移等值线图
PLNSOL，U，SUM                          ! 绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，X                            ! 绘制 X 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                            ! 绘制 Y 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Z                            ! 绘制 Z 方向应力等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                              ! 退出 ANSYS
```

3.5 梁分析实例详解——工字梁端面受力分析

3.5.1 问题描述

有一型号为 32a 的工字梁，其跨度为 1.0m，如图 3-51 所示，求其在集中力 P_1 和 P_2 作用下 O 点的挠度。该工字梁材料的弹性模量为 220GPa，泊松比为 0.3，集中力 P_1=8000N，P_2=5000N。

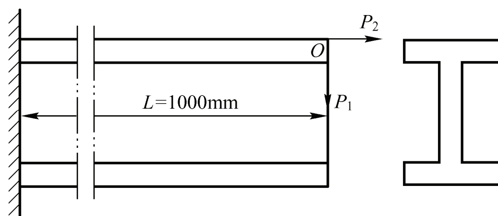


图 3-51　工字梁受力简图

3.5.2 问题分析

该问题属于梁的拉伸与弯曲问题。由于该工字梁属于标准型材，因此，在分析过程中选择图 3-52 所示的几何模型，通过选择相应的梁单元进行求解，这样就简化了 3D 模型复杂的建模过程和求解步骤。在本例中，选择 BEAM188 梁单元进行求解。

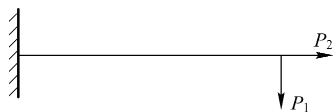


图 3-52　几何模型

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 BEAM3 梁单元。

3.5.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在

［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu｜File｜Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 I BEAM SUBJECTED TO CONCENTRATED FORCE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 2 node 188，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 3-53 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

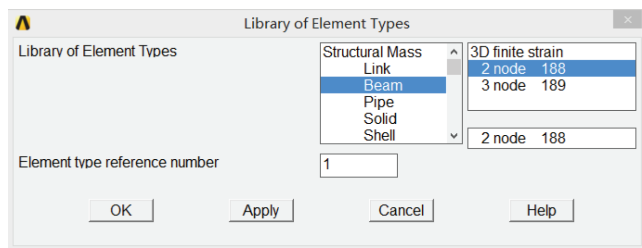


图 3-53　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框中的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Material Props｜Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structral、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material｜Exit 命令，关闭该对话框。

4）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Sections｜Beam｜Common Sections 命令，出现 Beam Tool 对话框，在 Sub-Type 下拉选框中选择工字梁标记，在 W1、W2、W3、t1、t2、t3 输入栏中分别输入 32a 型工字梁的特征参数，如图 3-54 所示。单击 Preview 按钮，ANSYS 显示窗口将显示工字梁的相关信息，如图 3-55 所示，单击 Beam Tool 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

4．创建有限元模型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Keypoints｜In Active CS 命令，出现 Create Keypoints In Active Coordinate System 对话框，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0，0，0。

提示：创建关键点。

2）单击 Apply 按钮，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 1，0，0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

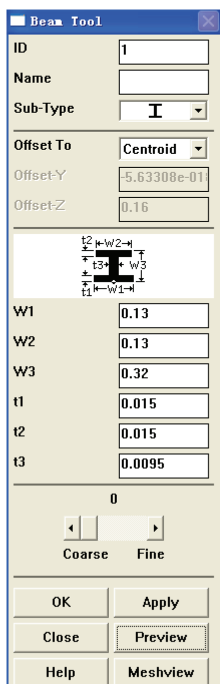


图 3-54　输入工字梁特征参数对话框

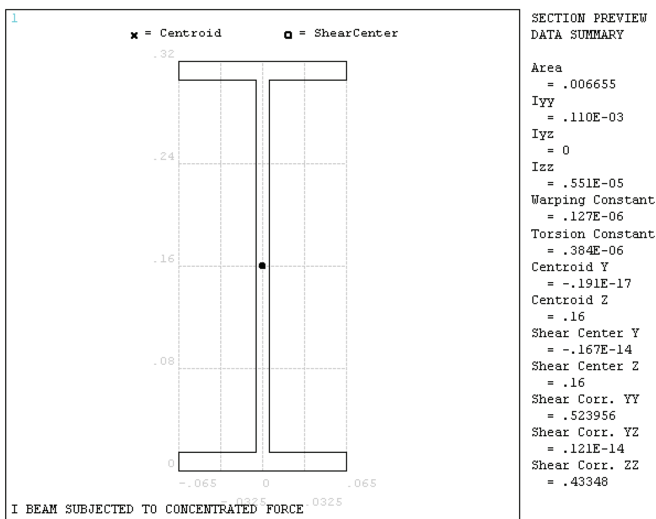


图 3-55　工字梁信息显示对话框

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP　Keypoint numbers 和 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点和线段编号。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active CS 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

6）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-56 所示的几何模型。

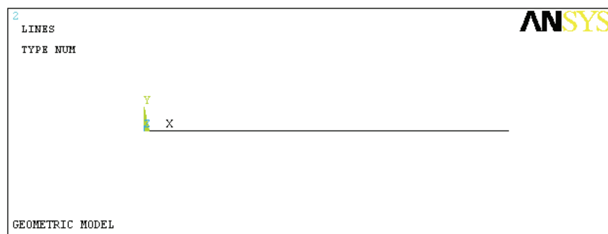


图 3-56　生成的几何模型结果显示

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on Picked Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Element Size on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输

入 10，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置线段单元等分数，即将线段 L1 划分为 10 等份。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

9）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints 命令，出现 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on KPs 对话框，参照图 3-57 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对关键点 1 施加 0 位移约束。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Keypoints 命令，出现 Apply F/M on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on KPs 对话框，在 Lab　Direction of force/mom 下拉选框中选择 FY，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-8000，如图 3-58 所示。

提示：负值表示载荷方向和 Y 轴相反。

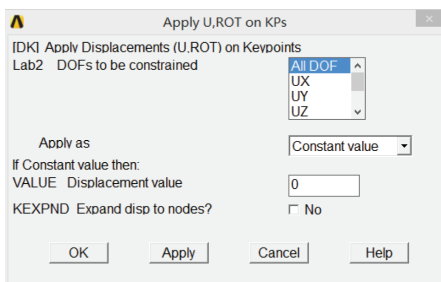


图 3-57　在关键点上施加位移载荷对话框

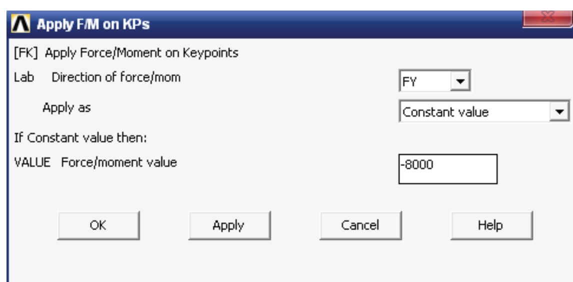


图 3-58　施加集中力载荷对话框

4）单击 Apply 按钮，在 Lab　Direction of force/mom 下拉选框中选择 FX，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入 5000，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对

话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

提示：若出现其他对话框，可关闭之。

7）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

8）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6. 查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+undeformed 选项，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 3-59 所示。

2）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。

3）在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF solution｜Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Y 方向的位移等值线图，如图 3-60 所示。

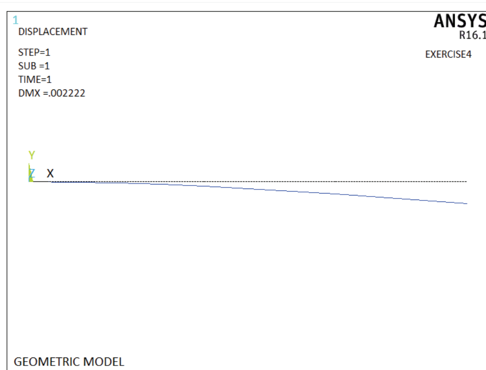


图 3-59　未变形和变形后的几何形状显示

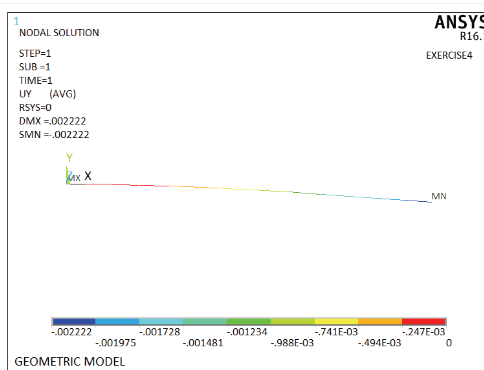


图 3-60　Y 方向位移结果显示

4）选择 Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-61 所示的节点反作用力结果。

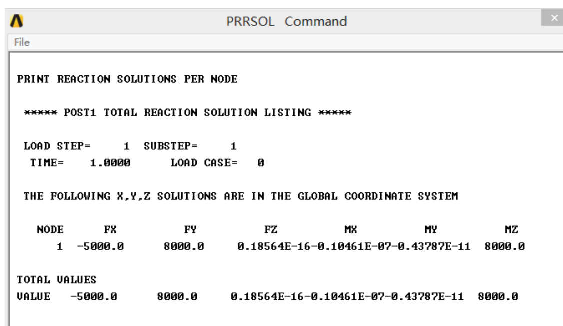


图 3-61　节点反作用力结果显示

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

✍ **试一试：** *所有求解结果均保存在 ANSYS 数据库中，读者可尝试通过相应的后处理操作寻找 O 点 Y 方向的精确位移（挠度）。*

3.5.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE4                            ！定义工作文件名
/TITLE，I BEAM SUBJECTED TO CONCENTRATED FORCE
                                               ！定义工作标题
/PREP7                                         ！进入前处理器
ET，1，BEAM188                                 ！定义单元类型
MP，EX，1，2.2E11                              ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                               ！输入泊松比
SECTYPE，1，BEAM，I                            ！指定梁的种类
SECDATA，0.13，0.13，0.32，0.015，0.015，0.0095
                                               ！输入工字梁横截面信息
K，1                                           ！创建关键点
K，2，1.0
/PNUM，KP，1                                   ！显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                                 ！显示线段编号
/REPLOT
L，1，2                                        ！创建线段
/TITLE，GEOMETRIC MODEL
LPLOT                                          ！显示线段
ESIZE，，10                                    ！设置单元等分数
LMESH，1                                       ！对线段进行网格划分
SAVE
FINISH

/SOLU                                          ！进入求解器
DK，1，，，，0，ALL                            ！在关键点 1 上施加位移约束
FK，2，FY，-8000                               ！在关键点 2 上施加集中力载荷
FK，2，FX，5000
SAVE
SOLVE                                          ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                         ！进入 POST1 后处理器
PLDISP，1                                      ！显示变形和未变形形状
PLNSOL，U，Y                                   ！绘制 Y 方向位移等值线图
PRRSOL                                         ！列表显示节点支反力
FINISH
/EXIT，ALL                                     ！退出 ANSYS
```

3.6 桁架分析实例详解——三角桁架受力分析

3.6.1 问题描述

图 3-62 所示为一个三角桁架，各杆件通过铰链连接，杆件材料参数及几何参数见表 3-3 和表 3-4，桁架受集中力 F_1=5000N、F_2=3000N 的作用，求桁架各点位移及反作用力。

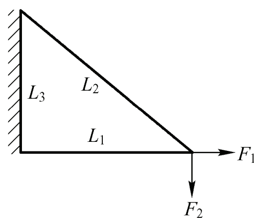


图 3-62　三角桁架受力简图

表 3-3　杆件材料参数

E_1/ Pa	E_2/ Pa	E_3/ Pa	ν_1	ν_2	ν_3
2.2E11	6.8E10	2.0E11	0.3	0.26	0.26

表 3-4　杆件几何参数

L_1 / m	L_2/ m	L_3 / m	A_1 / m^2	A_2/ m^2	A_3 / m^2
0.4	0.5	0.3	6E-4	9E-4	4E-4

3.6.2 问题分析

该问题属于桁架结构分析问题。对于一般的桁架结构，可通过选择杆单元，并将桁架中各杆件的几何信息以杆单元实常数的形式体现出来，从而将分析模型简化为平面模型。在本例分析过程中选择 LINK180 杆单元进行分析求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 LINK1 杆单元。

3.6.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 THE ANALYSIS OF TRUSS，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link 3D finit stn 180，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 3-63 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for LINK180 对话框，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 1，在 Cross-sectional area AREA 输入栏中输入 6E-4，在 Added Mass（Mass/Length）ADDMAS 输入栏中输入 0，如图 3-64 所示。

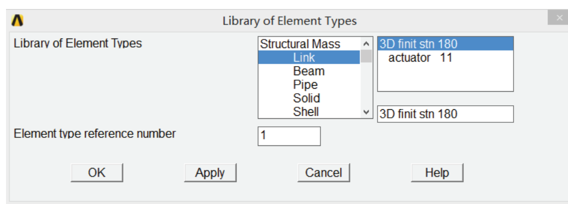


图 3-63 单元类型列表对话框

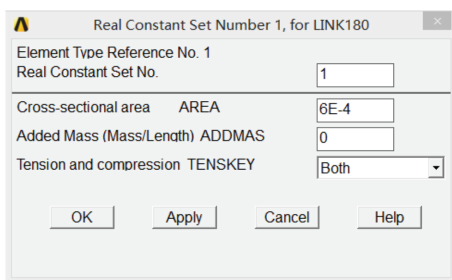


图 3-64 定义单元实常数对话框

4）单击 Apply 按钮，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 2，在 Cross-sectional area AREA 输入栏中输入 9E-4，在 Added Mass（Mass/Length）ADDMAS 输入栏中输入 0，单击 Apply 按钮，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 3，在 Cross-sectional area AREA 输入栏中输入 4E-4，在 Added Mass（Mass/Length）ADDMAS 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 6.8E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | New Model 命令，出现

Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 3 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.0E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4．创建有限元模型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints In Active Coordinate System 对话框。在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，如图 3-65 所示，单击 Apply 按钮，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0.4、0、0，单击 Apply 按钮，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 3，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0.3、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

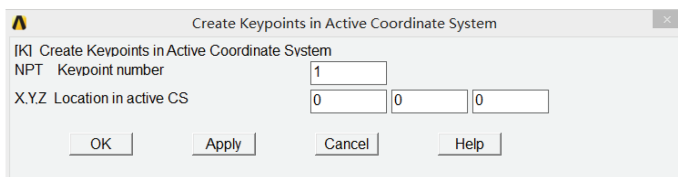


图 3-65 创建关键点对话框

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP Keypoint numbers 和 LINE Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点和线段编号。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active CS 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 2，3，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 3，1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

5）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-66 所示的几何模型。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置单元等分数。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，参照图 3-67 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取



菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

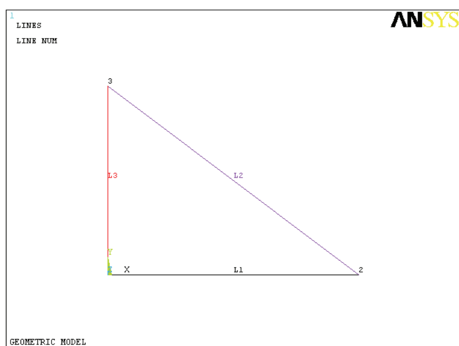


图 3-66　生成的几何模型结果显示

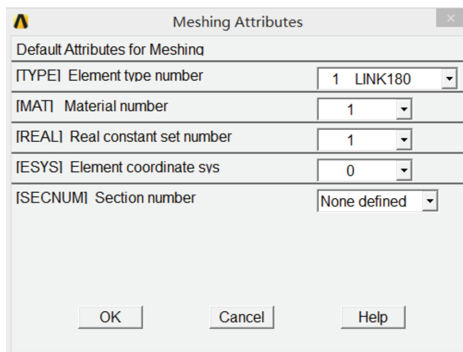


图 3-67　网格划分属性设置对话框

9）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 LINK180，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，在［REAL］ Real constant set number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

12）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 LINK180，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 3，在［REAL］ Real constant set number 下拉选框中选择 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 NODE Node numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示节点编号。

3）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，显示所有单元。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出

现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，参照图 3-68 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉选框中选择 FX，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入 5000，如图 3-69 所示。

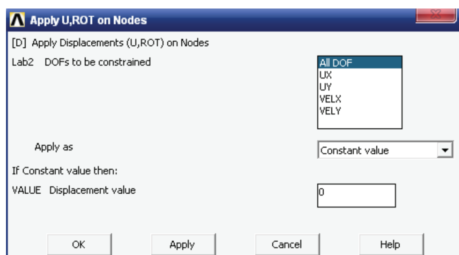


图 3-68 在节点上施加位移载荷对话框

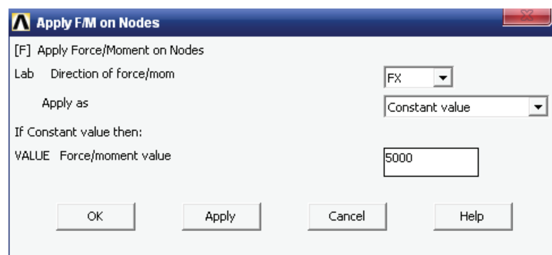


图 3-69 在节点上施加集中力载荷对话框

6）单击 Apply 按钮，在 Lab Direction of force/mom 下拉选框中选择 FY，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入-3000，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对于集中力载荷而言，负值表示载荷方向与坐标轴方向相反。

8）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

9）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+undeformed 选项，ANSYS 显示窗口将显示变形后和未变形的几何形状，如图 3-70 所示。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示位移等值线图，如图 3-71 所示。

3）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-72 所示的节点位移

计算结果。

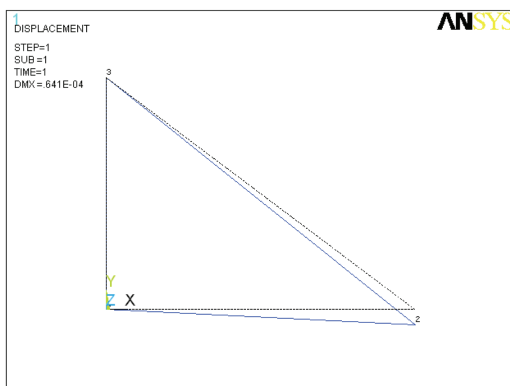


图 3-70　变形后和未变形的几何形状显示

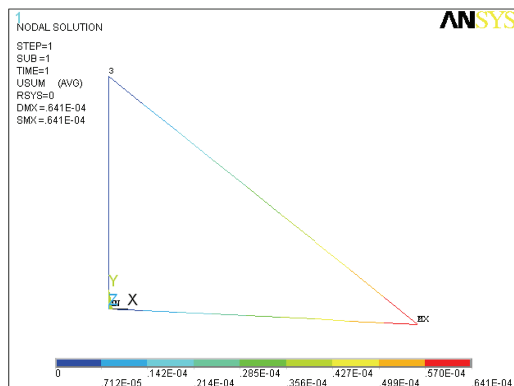
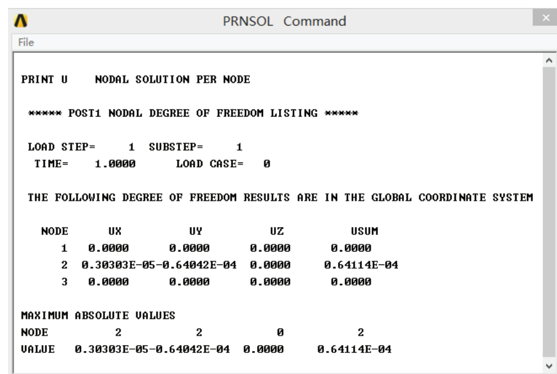


图 3-71　位移等值线图

4）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-73 所示的节点反作用力结果。



```
PRNSOL  Command
File

PRINT U    NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

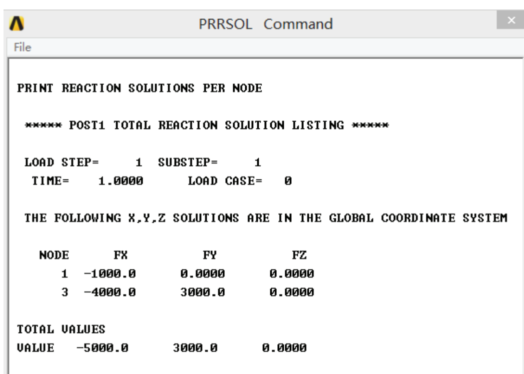
 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

   NODE       UX          UY          UZ          USUM
      1   0.0000      0.0000      0.0000       0.0000
      2  0.30303E-05-0.64042E-04  0.0000      0.64114E-04
      3   0.0000      0.0000      0.0000       0.0000

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE          2           2           0           2
VALUE   0.30303E-05-0.64042E-04  0.0000      0.64114E-04
```

图 3-72　节点位移计算结果



```
PRRSOL  Command
File

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

 ***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

    NODE       FX          FY          FZ
       1   -1000.0      0.0000      0.0000
       3   -4000.0      3000.0      0.0000

TOTAL VALUES
VALUE   -5000.0      3000.0      0.0000
```

图 3-73　节点反作用力计算结果

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可分两次对每个集中载荷单独进行求解，然后再将求解结果进行叠加，并和一次求解结果进行比较，查看是否一致。

3.6.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE5                        ！定义工作文件名
/TITLE，THE ANALYSIS OF TRUSS
                                           ！定义工作标题
/PREP7                                     ！进入前处理器
ET，1，LINK180                              ！定义单元类型
```



```
R，1，6E-4                                    ! 设置单元实常数
R，2，9E-4
R，3，4E-4
MP，EX，1，2.2E11                             ! 输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                              ! 输入泊松比
MP，EX，2，6.8E10
MP，PRXY，2，0.26
MP，EX，3，2.0E11
MP，PRXY，3，0.26

K，1，0，0，0                                 ! 生成关键点
K，2，0.4，0，0
K，3，0，0.3，0
/PNUM，KP，1                                  ! 显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                                ! 显示线段编号
L，1，2                                       ! 生成线段
L，2，3
L，3，1
/TITLE，GEOMETRIC MODEL
LPLOT                                         ! 显示线段
ESIZE，，1                                    ! 设置线段等分数
MAT，1                                        ! 指定材料参考号
REAL，1                                       ! 指定实常数参考号
LMESH，1                                      ! 对线段进行网格划分
LPLOT
MAT，2
REAL，2
LMESH，2
LPLOT
MAT，3
REAL，3
LMESH，3
SAVE
FINISH

/SOLU                                         ! 进入求解器
ANTYPE，STATIC                                ! 指定分析类型
/PNUM，NODE，1                                ! 显示节点编号
EPLOT                                         ! 显示单元
D，1，ALL                                     ! 施加位移约束
D，3，ALL
F，2，FX，5000                                ! 施加集中力载荷
F，2，FY，-3000
SAVE
SOLVE                                         ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                        ! 进入 POST1 后处理器
PLDISP，1                                     ! 显示变形和未变形形状
```

```
PLNSOL，U，SUM                                    ！绘制位移等值线图
PRNSOL，U，COMP                                   ！列表显示节点位移
PRRSOL                                            ！列出反作用力
FINISH
/EXIT，ALL                                        ！退出 ANSYS
```

3.7 壳分析实例详解——薄壁圆筒受力分析

3.7.1 问题描述

图 3-74 所示为一薄壁圆筒，在其中心受集中力 F 的作用，求 A、B 两点的位移。

圆筒几何参数：

长度 L=0.2m；半径 R=0.05m；壁厚 t=2.5mm

圆筒材料参数：

弹性模量 E=120GPa；泊松比ν=0.3

载荷：F=2000N

3.7.2 问题分析

该问题属于薄壁件的结构分析问题。根据对称性，选择圆筒的 1/8 建立几何模型，相应的载荷为原载荷的 1/4，几何模型如图 3-75 所示，选择 SHELL181 壳单元进行分析求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SHELL150 壳单元。

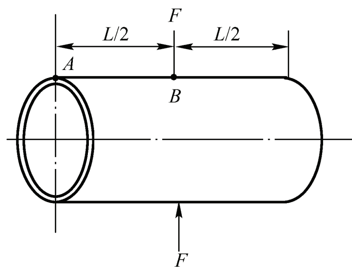


图 3-74 薄壁圆筒受力简图

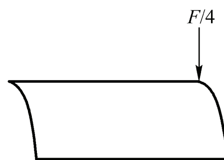


图 3-75 几何模型

3.7.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 PINCHED CYLINDER，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell 3D 4node 181，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 3-76 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

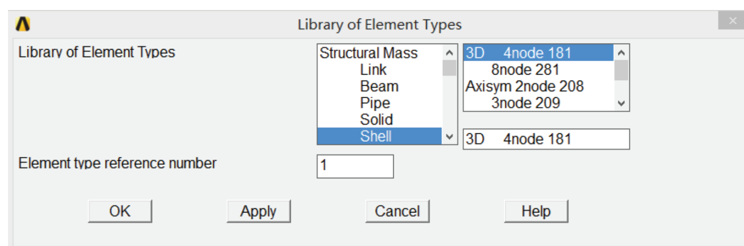


图 3-76 单元类型列表对话框

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structral、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 1.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框，在 Thickness 输入栏中输入 0.0025，其余选项采用默认设置，如图 3-77 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

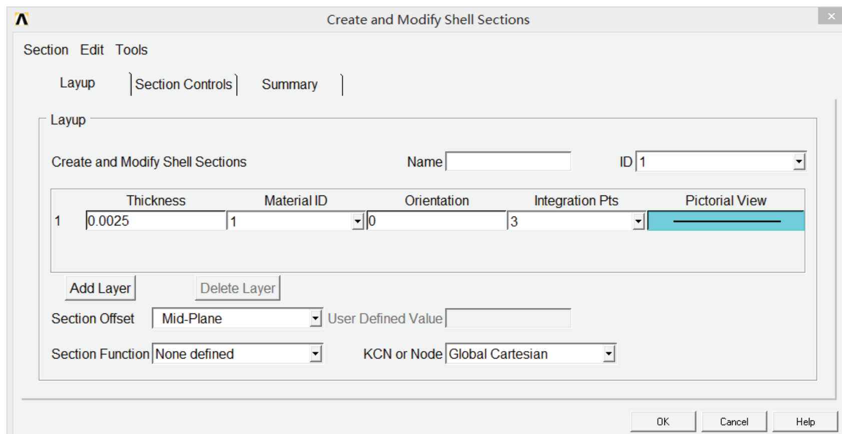


图 3-77 定义壳单元横截面对话框

4．生成几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当

前坐标系转变为柱坐标系。

提示：以下操作将在柱坐标系中进行。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints In Active Coordinate System 对话框。在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0.05，0，0，如图 3-78 所示；单击 Apply 按钮，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0.05，0，0.1。

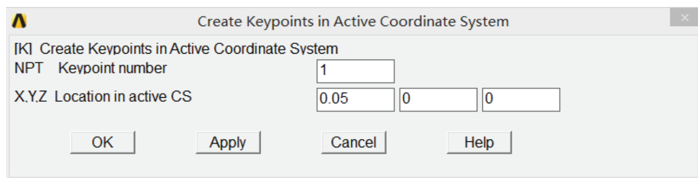


图 3-78 创建关键点对话框

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，参照图 3-79 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

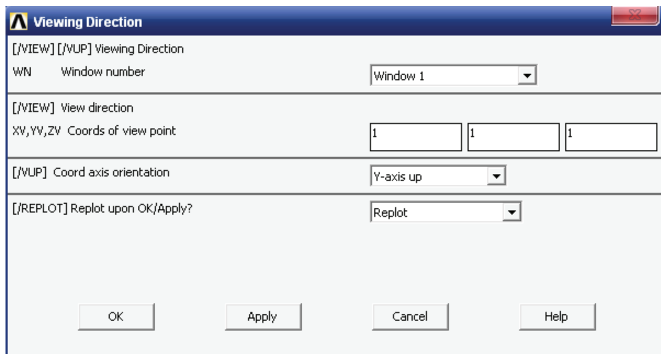


图 3-79 视图显示方向设置对话框

技巧：可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

4）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP Keypoint numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | Plot | Keypoints | Keypoints 命令，显示所有关键点。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Keypoints 命令，出现 Copy Keypoints 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮，出现 Copy Keypoints 对话框，在 ITIME Number of copies 输入栏中输入 2，在 DX X-offset in active CS 输入栏中输入 0，在 DY Y-offset in active CS 输入栏中输入 90，在 DZ Z-offset in active CS 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs

命令，出现 Create Area thru 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，4，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

注意：需按照次序输入关键点编号。

8）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

9）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

10）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 10，如图 3-80 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置线段单元等分数，即将编号为 1、3 的线段分为 10 等份。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将编号为 2、4 的线段分为 8 等份。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该对话框。

14）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 3-81 所示。

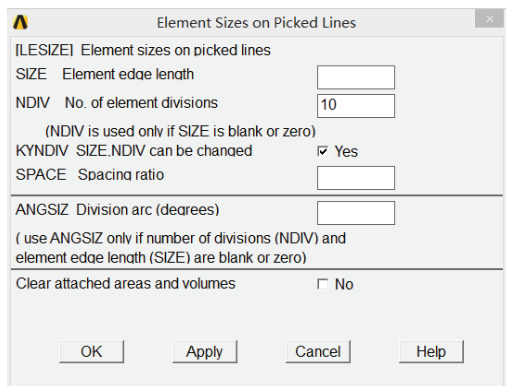


图 3-80 单元划分设置对话框

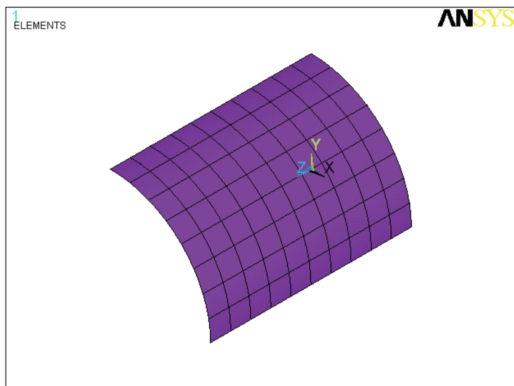


图 3-81 网格划分结果显示

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对

话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为直角坐标系。

注意：以下操作将在直角坐标系中进行。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标为 0 的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉选框中选择 X-axis，在 KCN Coordinate system no.输入栏中输入 0，如图 3-82 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

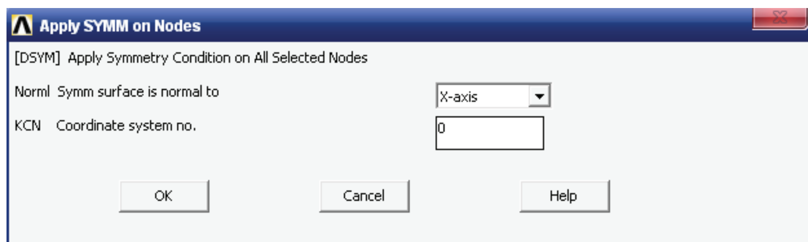


图 3-82 施加对称位移约束对话框

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标为 0 的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉选框中选择 Y-axis，在 KCN Coordinate system no.输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Z 坐标为 0 的所有节点。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement |

Symmetry B.C.｜On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉选框中选择 Z-axis，在 KCN Coordinate system no.输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

10）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment｜On Keypoints 命令，出现 Apply F/M on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on KPs 对话框，参照图 3-83 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

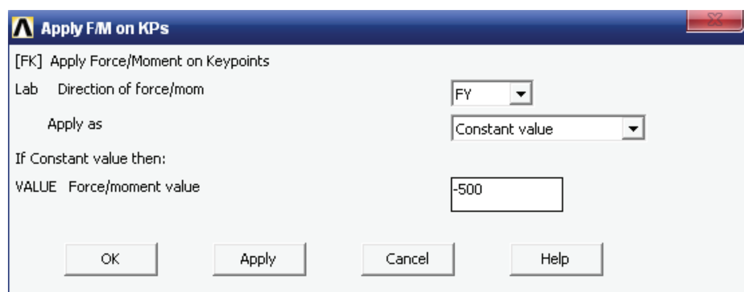


图 3-83 在关键点上施加集中力载荷对话框

11）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

13）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

14）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Read Results｜Last Set 命令，读取最后一步的求解结果。

2）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+undeformed 选项，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状和未变形的几何形状，如图 3-84 所示。

3）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Result｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF solution｜Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示合位移等值线图，如图 3-85 所示。

4）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.05，在第 5 栏中选择 From Full，如图 3-86a 所示。

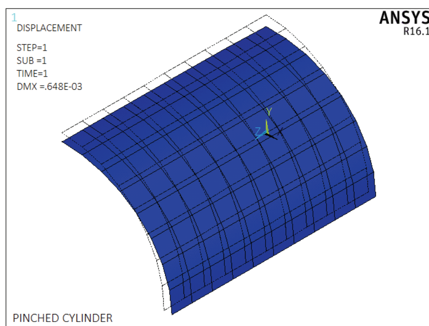


图 3-84　变形后和未变形的几何形状显示

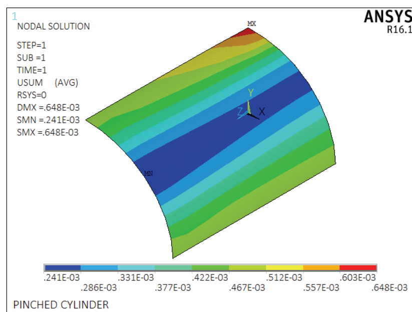


图 3-85　合位移等值线图

5）单击 Apply 按钮，第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，如图 3-86b 所示，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，如图 3-86c 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

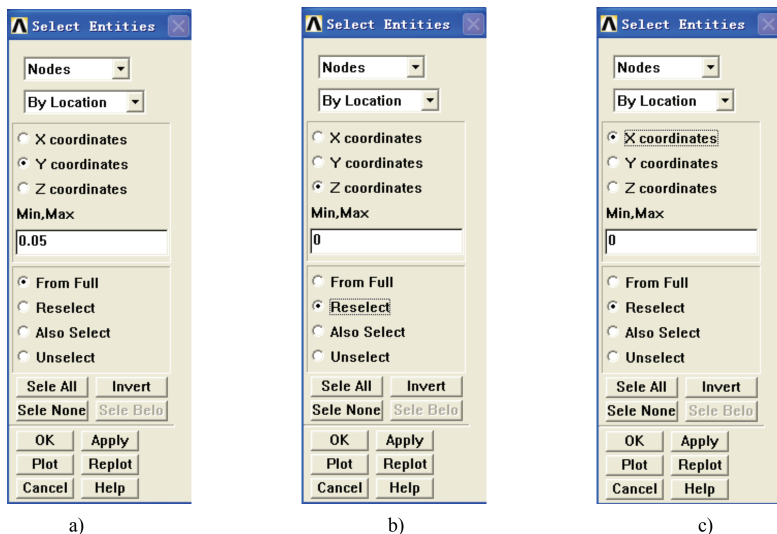


图 3-86　选择实体对话框

提示：通过以上两步操作选择坐标值为（0，0.05，0）的节点。

6）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-87 所示的节点位移计算结果。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.05，在第 5 栏中选择 From Full。

8）单击 Apply 按钮，第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.1，在第

5 栏中选择 Reselect，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：通过以上两步操作来选择坐标值为（0，0.05，0.1）的节点。

9）选择 Main Menu | General Postproc | List Result | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示如图 3-88 所示的节点位移计算结果。

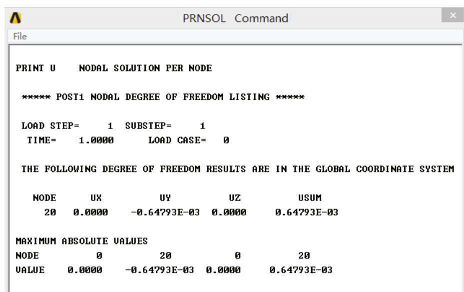


图 3-87 B 点位移结果显示

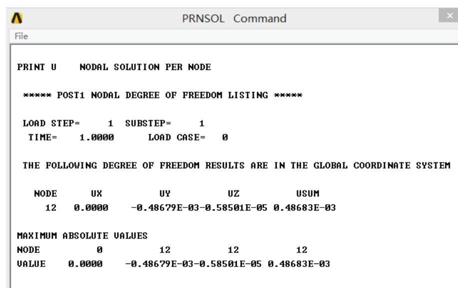


图 3-88 A 点位移结果显示

10）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可对整体模型进行建模，并施加相应的边界条件，再进行求解计算，注意分析求解结果和上述实例求解结果的差别。

3.7.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE6                    ！定义工作文件名
/TITLE，PINCHED CYLINDER               ！定义工作标题

/PREP7                                 ！进入前处理器
ET，1，SHELL181                        ！定义单元类型
MP，EX，1，1.2E11                      ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                       ！输入泊松比
SECTYPE，，SHELL
SECDATA，2.5E-3                        ！定义圆筒壁厚
CSYS，1                                ！将坐标系转变为柱坐标系
K，1，0.05，0，0                       ！创建关键点
K，2，0.05，0，0.1
/VIEW，1，1，1，1                      ！设置视图显示方向
/PNUM，KP，1                           ！显示关键点编号
KPLOT                                  ！显示关键点
KGEN，2，1，2，1，，90                 ！生成关键点
A，1，2，4，3                          ！由关键点生成面
/PNUM，LINE，1                         ！显示线段编号
LPLOT                                  ！显示线段
```

```
LSEL，S,,，1，3，2                                  ！选择线段
LESIZE，ALL,,，10                                  ！设置线段等分数
LSEL，S,,，2，4，2
LESIZE，ALL,,，8
ALLSEL                                             ！选择所有实体
AMESH，ALL                                         ！对面进行网格划分
EPLOT                                              ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                              ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                     ！指定分析类型
CSYS，0                                            ！将坐标系转变为直角坐标系
NSEL，S，LOC，X，0                                 ！选择节点
DSYM，SYMM，X，0                                   ！施加对称位移载荷
NSEL，S，LOC，Y，0
DSYM，SYMM，Y，0
NSEL，S，LOC，Z，0
DSYM，SYMM，Z，0
EPLOT
ALLSEL                                             ！选择所有实体
FK，3，FY，-500                                    ！施加集中力载荷
SAVE
SOLVE                                              ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                             ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST                                          ！读取最终的求解结果
PLDISP，1                                          ！显示变形和未变形形状
PLNSOL，U，SUM                                     ！绘制合位移等值线图
NSEL，S，LOC，Y，0.05                              ！选择节点
NSEL，R，LOC，Z，0
NSEL，R，LOC，X，0
PRNSOL，U，COMP                                    ！列表显示节点位移
NSEL，S，LOC，Y，0.05
NSEL，R，LOC，Z，0.1
NSEL，R，LOC，X，0
PRNSOL，U，COMP
FINISH
/EXIT，ALL                                         ！退出 ANSYS
```

3.8 接触分析实例详解——钢球和刚性平面接触分析

3.8.1 问题描述

图 3-89 所示为一半径为 8mm 的钢球和一刚性平面的接触示意图，在球顶施加集中力 F 的作用，求 Hertz 接触半径。

钢球材料参数：

弹性模量 E=220GPa；泊松比ν=0.3

载荷：F=5000N

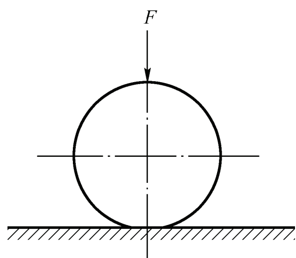


图 3-89 钢球同刚性平面接触示意图

3.8.2 问题分析

该问题属于 Hertz 弹性接触问题。根据球对称性，选择钢球截面的 1/2 建立几何模型，并选择轴对称 8 节点四边形单元 PLANE183 和接触单元 CONTA178 进行分析求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE82 结构单元。

3.8.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE7，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 CONTACTING PROBLEM BETWEEN SPHERE AND INFINITE RIGID PLANE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 3-90 所示。

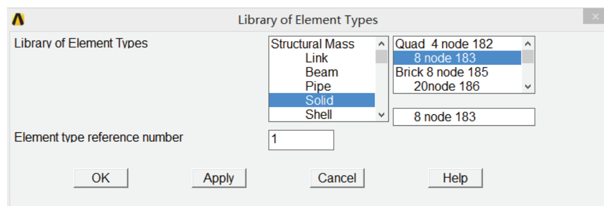


图 3-90 单元类型列表对话框

2）单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Contact　nd-to-nd 178，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Element Types 对话框选中 Type 1 Plane183，单击 Options 按钮，出现 PLANE183 element type options 对话框，在 Element behavior　K3 下拉选框中选择 Axisymmetric，其余选项采用默认设置，如图 3-91 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

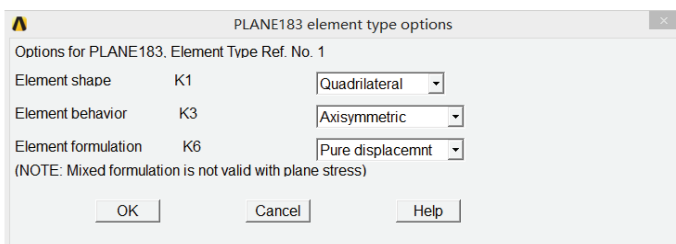


图 3-91　PLANE183 单元属性设置对话框

提示：将单元属性设置为轴对称。

4）在 Element Types 对话框选中 Type 2 CONTA178，单击 Options 按钮，出现 CONTA178 element type options 对话框，在 Contact algorithm　K2 下拉选框中选择 Lagrange method，其余选项采用默认设置，如图 3-92 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Contants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constant 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constant 对话框，选择 Type　2 CONTA178，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for CONTA178 对话框，参照图 3-93 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

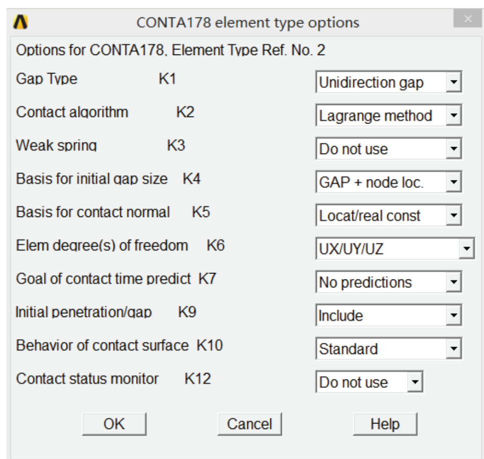


图 3-92　CONTA178 单元属性设置对话框

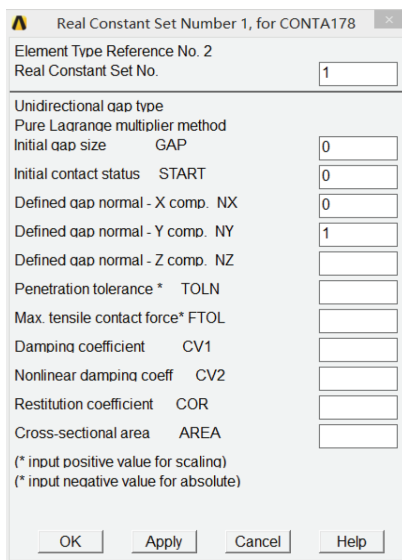


图 3-93　CONTA178 单元实常数设置对话框

7）单击 Real Constant 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。在 EX 输入栏中输入 220E3，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4．生成几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At Specified Loc 命令，出现 Create CS at Loca 拾取菜单，在输入栏中输入 0，8，0，单击 OK 按钮，出现 Create Local CS at Specified Location 对话框，参照图 3-94 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

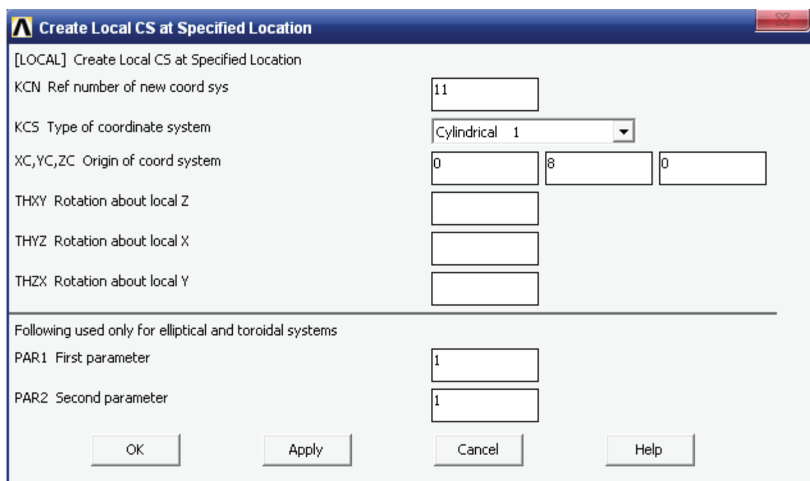


图 3-94 创建局部坐标系对话框

提示：创建一个局部柱坐标系，直到进行下一次坐标系变换之前，其后所有的操作均在此局部坐标系下进行。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints In Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 8，-90，0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）参照第 2）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口创建以下关键点及其编号：

2（8，0，0）； 3（7.5，-90，0）； 4（7.5，0，0）；

5（0，0，0）； 6（8，-82.65，0）； 7（7.5，-82.65，0）

4）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP Keypoint numbers 和 LINE Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其

余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点和线段编号。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择编号为 1、3 的关键点生成一条线段，再选择编号为 2、4 的关键点生成第 2 条线段，再选择编号为 6、7 的关键点生成第 3 条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Size on All Selected Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 1，如图 3-95 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs 命令，出现 Create Area thru 拾取菜单，在输入栏中输入 1，6，7，3，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 6，2，4，7，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 3，7，4，5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

注意：需按照上述顺序依次输入。

8）选择 Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At Specified Loc 命令，出现 Create CS at Loca 拾取菜单，在输入栏中输入 0，8，0，单击 OK 按钮，出现 Create Local CS at Specified Location 对话框，在 KCN　Ref number of new coord sys 输入栏中输入 12，在 KCS　Type of coordinate system 下拉选框中选择 Cartesian　0，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：创建一个局部直角坐标系，其后所有的操作均在此局部坐标系下进行。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Reflect | Areas 命令，出现 Reflect Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Reflect Areas 对话框，在 Ncomp　Plane of symmetry 选项中选择 X-Z plane Y，其余选项采用默认设置，如图 3-96 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

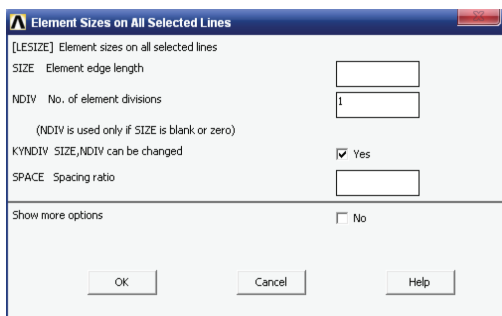


图 3-95　单元等分数设置对话框

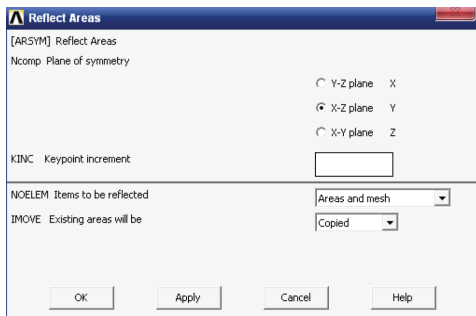


图 3-96　映射面对话框

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label　Type of item to be merged 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作目的为合并同位置重复定义的实体，包括关键点、线段及面。

11）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的几何模型，如图 3-97 所示。

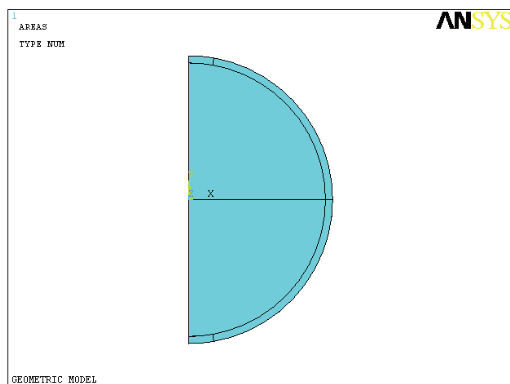


图 3-97　生成的几何模型结果显示

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 4，5，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 10，12，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 6，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 8，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作表示将编号为 6 的线段划分为长度不断递增的 8 个单元，且最后 1 个单元的长度为第 1 个单元长度的 8 倍。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 7，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 8，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.125，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作表示将编号为 7 的线段划分为长度不断递减的 8 个单元，且最后 1 个

单元的长度为第 1 个单元长度的 0.125 倍。

17）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 9，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 6，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 PLANE183，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对即将通过网格划分而得到的单元设置属性。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，3，4，5，6，单击 OK 按钮关闭菜单。

20）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为直角坐标系。

注意：以下的操作将在直角坐标系中进行。

21）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1001，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入-1、1E-8、0，如图 3-98 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

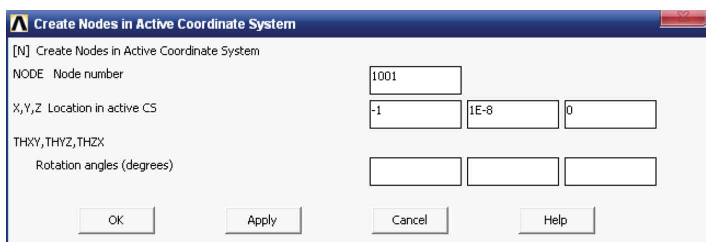


图 3-98 生成节点对话框

22）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 2 CONTA178，在［REAL］ Real constant set number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | User Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Create Elems User-Num 对话框，在 Number to assign to element 输入栏中输入 205，单击 OK 按钮，出现 Create Elems User-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 1001，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

24）参照上一步的操作过程，通过节点创建以下编号的单元：

201（1001，4）；202（1001，6）；203（1001，8）；204（1001，10）；206（1001，31）

技巧：用户可通过选择 Utility Menu | List | Elements | Nodes+Attributes 命令查看所

生成的单元。

25）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 3-99 所示。

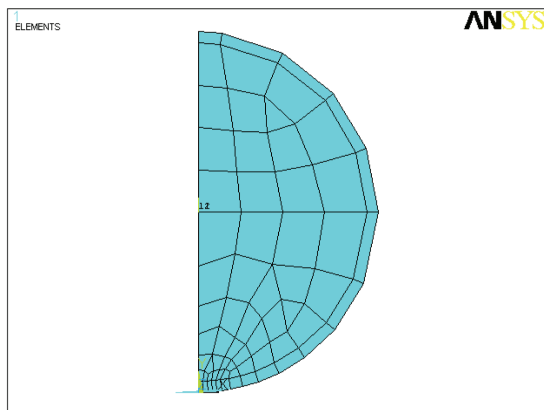


图 3-99　网格划分结果显示

26）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，在输入栏中输入 1001，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对编号为 1001 的节点施加全位移约束。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标为 0 的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be contrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加 X 方向的 0 位移约束。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标为 0 的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 Apply as 下拉选框中选择 Contact value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加 Y 方向的 0 位移约束。

7）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Keypoints 命令，出现 Apply F/M on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 8，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，参照图 3-100 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

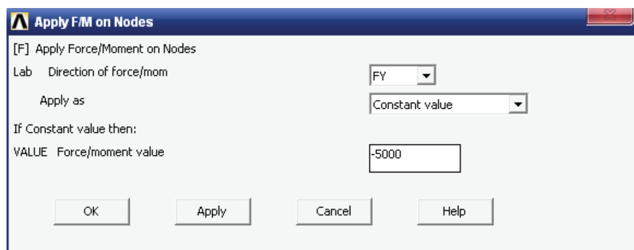


图 3-100 在关键点上施加集中力载荷对话框

9）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

11）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Result | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution

| DOF solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 X 方向位移等值线图，如图 3-101 所示。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Result | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 Y 方向位移等值线图，如图 3-102 所示。

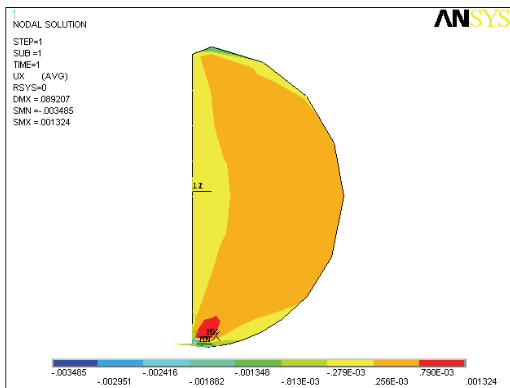


图 3-101　X 方向位移等值线图

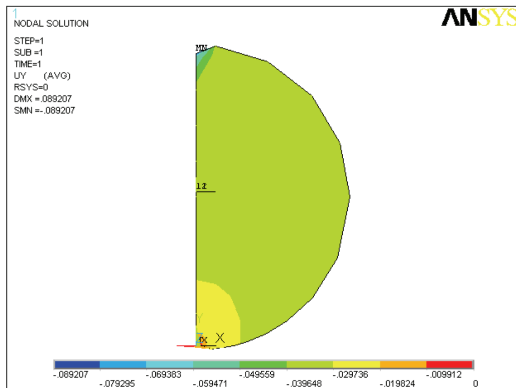
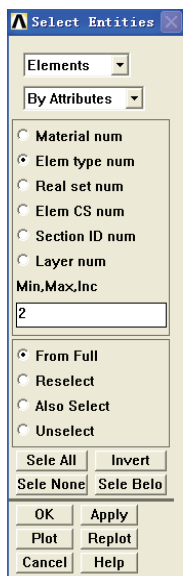
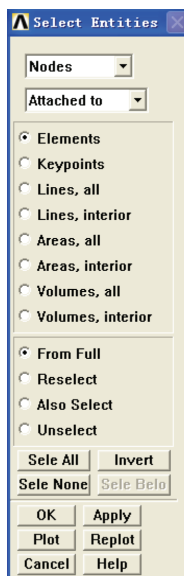


图 3-102　Y 方向位移等值线图

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，将会出现 Select Entities 对话框，参照图 3-103a 对其进行设置，单击 Apply 按钮，参照图 3-103b 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a)



b)

图 3-103　选择实体对话框

提示：选择接触单元上的所有节点。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table 命令，出现 Element Table Data 对话框，单击 Add 按钮，出现 Define Additional Element Table Items 对话框，参照图 3-104 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Element Table Data 对话框中的 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Element Table | Sum of Each Item 命令，出现 Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示接触支反力为 RFOR=-4752.84。

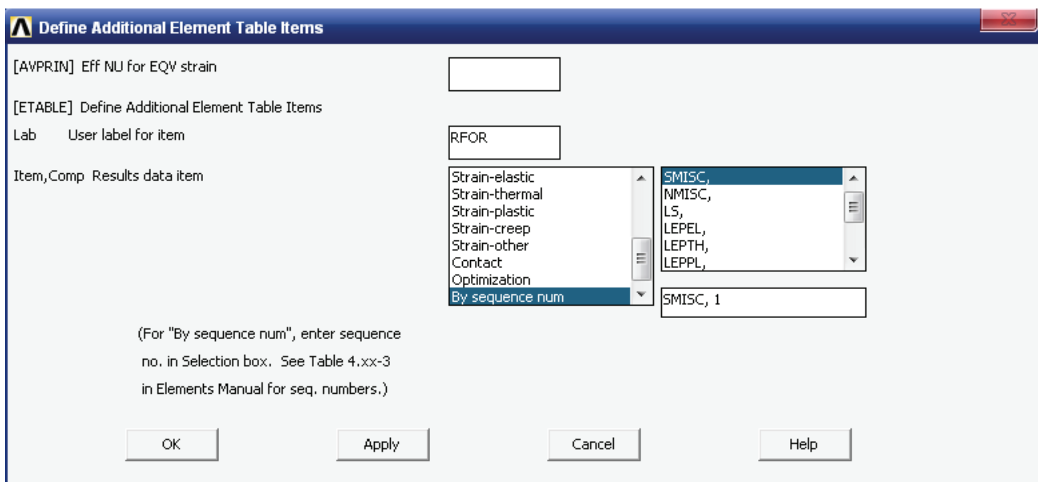


图 3-104 定义单元列表项目对话框

6）在 ANSYS 命令输入栏中输入以下命令，按〈Enter〉键，计算接触半径。

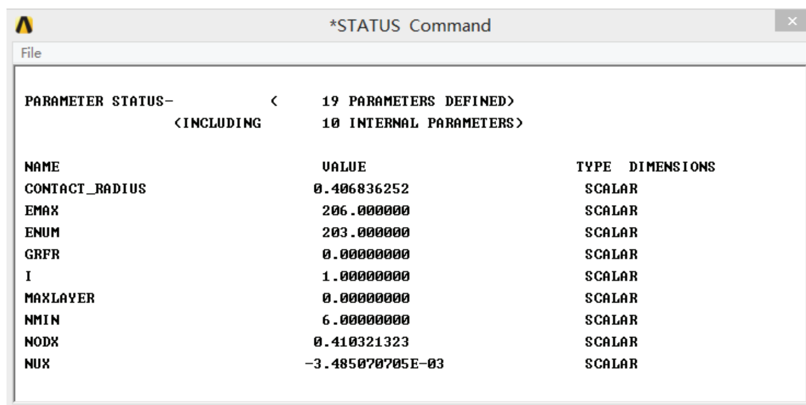
```
*GET，EMAX，ELEM，，NUM，MAX
*DO，ENUM，201，EMAX
*GET，GRFR，ELEM，ENUM，ETAB，RFOR
*IF，GRFR，EQ，0.0，EXIT
*ENDDO
ESEL,，ELEM,，(ENUM-1)
NSLE
*GET，NMIN，NODE，0，NUM，MIN
NODX=NX（NMIN）
NUX =UX（NMIN）
CONTACT_RADIUS=NODX+NUX
```

技巧：可以将命令先写入记事本文件，再采用复制和粘贴的方式输入。注意，命令写入时一定要使用英文标点符号。

7）选择 Utility Menu | List | Other | Parameters 命令，ANSYS 显示窗口将显示参量计算结果，如图 3-105 所示，从中可以看出接触半径 CONTACT_RADIUS 约为 0.4068。

8）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save！选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：本例主要进行弹性接触分析，读者可参照此例，对两个圆球相互接触的情况进行求解分析。



```
PARAMETER STATUS-           (      19 PARAMETERS DEFINED)
                  (INCLUDING       10 INTERNAL PARAMETERS)

NAME                              VALUE                        TYPE  DIMENSIONS
CONTACT_RADIUS                   0.406836252                    SCALAR
EMAX                              206.000000                    SCALAR
ENUM                              203.000000                    SCALAR
GRFR                              0.00000000                    SCALAR
I                                 1.00000000                    SCALAR
MAXLAYER                          0.00000000                    SCALAR
NMIN                              6.00000000                    SCALAR
NODX                             0.410321323                    SCALAR
NUX                            -3.485070705E-03                 SCALAR
```

图 3-105　参量计算结果显示

3.8.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE7                          ！定义工作文件名
/TITLE，HERTZ CONTACTING PROBLEM             ！定义工作标题

/PREP7                                       ！进入前处理器
ET，1，PLANE183                              ！定义单元类型
ET，2，CONTA178
KEYOPT，1，3，1                              ！设置单元关键字
KEYOPT，2，2，4
R，1                                         ！设置单元实常数
RMOD，1，7，1
MP，EX，1，220E3                             ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                             ！输入泊松比
LOCAL，11，1，0，8，0                        ！定义局部柱坐标系
K，1，8，-90                                 ！创建关键点
K，2，8
K，3，7.5，-90
K，4，7.5
K，5
K，6，8，-82.65
K，7，7.5，-82.65
L，1，3                                      ！由关键点生成线段
L，2，4
L，6，7
LESIZE，ALL，，，1
A，1，6，7，3                                ！由关键点生成面
A，6，2，4，7
A，3，7，4，5
LOCAL，12，0，0，8，0                        ！定义局部直角坐标系
```

```
ARSYM，Y，1，3，1                                    ! 沿 Y 轴映射面
NUMMRG，ALL                                          ! 合并实体
ESIZE，，4                                           ! 设置单元尺寸
LESIZE，4，，，5
LESIZE，5，，，5
LESIZE，10，，，1
LESIZE，12，，，1
LESIZE，6，，，8，8
LESIZE，7，，，8，0.125
LESIZE，9，，，6，0.2
TYPE，1                                              ! 指定单元类型参考号
AMESH，1，2，1                                       ! 对面进行网格划分
AMESH，4，5，1
AMESH，3，6，3
CSYS，0
N，1001，-1，1E-8                                    ! 创建节点
TYPE，2
REAL，1
EN，205，1001，2                                     ! 创建单元
EN，201，1001，4
EN，202，1001，6
EN，203，1001，8
EN，204，1001，10
EN，206，1001，31
EPLOT                                                ! 显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                                ! 进入求解器
D，1001，ALL
NSEL，S，LOC，X，0                                   ! 选择节点
D，ALL，UX，0                                        ! 施加位移载荷
NSEL，R，LOC，Y，0
D，ALL，UY，0
ALLSEL                                               ! 选择所有实体
FK，8，FY，-5000                                     ! 施加集中力载荷
SAVE
SOLVE                                                ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                               ! 进入后处理器
PLNSOL，U，X                                         ! 绘制 X 方向位移等值线图
PLNSOL，U，Y                                         ! 绘制 Y 方向位移等值线图
ESEL，，TYPE，，2                                    ! 选择单元
NSLE                                                 ! 选择单元上所有节点
ETABLE，RFOR，SMISC，1
SSUM                                                 ! 显示总反作用力
*GET，EMAX，ELEM，，NUM，MAX                         ! 获取单元编号
*DO，ENUM，201，EMAX                                 ! 从 201 单元开始循环搜索
```

```
*GET，GRFR，ELEM，ENUM，ETAB，RFOR          ！查找最后的接触单元
*IF，GRFR，EQ，0.0，EXIT
*ENDDO
ESEL，，ELEM，，(ENUM-1)                     ！选择单元
NSLE                                         ！选择单元上的所有节点
*GET，NMIN，NODE，0，NUM，MIN                ！获取节点编号
NODX=NX(NMIN)
NUX =UX(NMIN)
CONTACT_RADIUS=NODX+NUX
*STATUS，PARM                                ！列表显示当前参量
FINISH
/EXIT，ALL                                   ！退出 ANSYS
```



第 4 章 ANSYS 16.1 结构动力学分析及实例详解

本章导读：

本章主要介绍各种类型动力学分析的工程应用实例，包括模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析及谱分析，通过对各种实例进行具体、详细的分析求解，不仅使读者熟悉动力学问题分析的基本方法和基本步骤，同时也为读者提供了大量工程结构动力学问题的求解思路。

4.1 结构动力学分析基本过程

4.1.1 模态分析

模态分析主要用于确定结构或机器部件的振动特性，即结构的固有频率和振型，它们是结构承受动态载荷结构设计中的重要参数。同时模态分析也是其他动力学分析的基础，如谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析等。

典型的无阻尼模态分析求解的基本方程是经典的特征值问题：

$$[K]\{\Phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\Phi_i\}$$

其中：

$[K]$=刚度矩阵；

$\{\Phi_i\}$=第 i 阶模态的振型向量（特征向量）；

ω_i=第 i 阶模态的固有频率（ω_i^2 是特征值）；

$[M]$=质量矩阵。

模态分析主要包括以下 4 个步骤：

- 建立模型
- 加载求解
- 扩展模态
- 观察结果

1．建立模型

模态分析的建模过程与其他分析的建模过程类似，但在模态分析建模过程中应注意以下两个问题：

- 模态分析属于线性分析，即在模态分析过程中只有线性行为是有效的，如果在分析中指定了非线性单元，程序在计算过程中将忽略其非线性行为并将该单元作为线性单元处理。例如，如果分析中包含接触单元，则刚度矩阵在分析过程中处于初始状态并保持不变。
- 在模态分析中，材料的性质可以是线性的、非线性的、恒定的或与温度相关的。在分析中必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS，但非线性性质将被忽略。

2．加载并求解

（1）进入 ANSYS 求解器

Command：/SOLU

GUI：Main Menu｜Solution

（2）定义分析类型及分析选项

表 4-1 是模态分析中可以使用的选项。

表 4-1　分析类型和分析选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis
Analysis Type：Modal	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis｜Modal
Mode Extraction Method	MODOPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Number of Modes to Extract	MODOPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Number of Modes to Expand	MXPAND	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Mass Matrix Formution	LUMPM	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Prestres Effects Calculation	PSTRES	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options

- New Analysis（ANTYPE）

此选项用于选择新的分析类型。

- Analysis Type（ANTYPE）

此选项用于指定模态分析类型，应选择 Modal。

- Mode Extraction Method（MODOPT）

此选项用于指定模态提取方法，ANSYS 程序提供的模态提取方法有以下 8 种：

① Block Lanczos（分块兰索斯）法

② PCG Lanczos（预条件共轭梯度兰索斯）法

③ 子空间（Subspace）法

④ 非对称（Unsymmetric）法

⑤ 阻尼（Damped）法

⑥ QR 阻尼（QR Damped）法

⑦ 超节点（Supernode）法

⑧ 变分技术（Variational Technology）法

注意：阻尼法和非对称法在 ANSYS/Professional 中不可用。

其中，前两种方法是最常用的模态分析方法，在大多数的模态分析中采用，而后 4 种方法只有在特殊情况下才会使用。

Block Lanczos 法特征值求解器是默认求解器，它采用 Lanczos 算法，是用一组向量来实现 Lanczos 递归计算。无论 EQSLV 命令指定过何种求解器进行求解，Block Lanczos 法都将自动采用稀疏矩阵方程求解器。计算某系统特征值谱所包含一定范围的固有频率时，采用 Block Lanczos 法提取模态特别有效。计算时，求解从频率谱中间位置到高频端范围内的固有频率时的求解收敛速度和求解低阶频率时基本上一样快。因此，当采用频移频率（FREQB）来提取从 FREQB（起始频率）的 n 阶模态时，该法提取大于 FREQB 的 n 阶模态和提取 n 阶低频模态的速度基本相同。

PCG Lanczos 法适合于非常大型的对称特征值问题（大于 500000 个自由度）的求解，对于获取低阶模态解以便了解模型的力学行为特别有用。PCG Lanczos 法采用 PCG 迭代求解器， 因此具有某些限制（例如，不支持超单元、接触单元不支持 Lagrange 选项、混合 U-P 单元等）。PCG Lanczos 法可以使用 PCGOPT 命令中不同的 Lev_Duiff 值。该方法同样可以使用 MSAVE 命令来减少内存的使用。默认情况下，PCG Lanczos 法并不进行 Sturm sequence 检查。PCG Lanczos 法是唯一被优化用于 ANSYS 分布式求解的特征值求解器。

子空间法使用子空间迭代技术，它内部使用广义 Jacobi 迭代算法。由于该方法采用完整的[K]和[M]矩阵，因此精度很高，但是计算速度较慢。这种方法经常用于对计算精度要求高，但无法选择主自由度（DOF）的情形。做模态分析时如果模型包含大量的约束方程，使用子空间法提取模态应当采用波前（front）求解器，不要采用 JCG 求解器；或者是使用 Block Lanczos 法提取模态。当用户的分析中存在大量约束方程时，如果采用 JCG 求解器组集内部单元刚度，则必须有很大的内存才能进行下去。

非对称法采用完整的[K]和[M]矩阵，适用于刚度和质量矩阵为非对称的问题（例如流体-结构耦合问题）。此法采用 Lanczos 算法，如果系统是非保守的（例如轴安装在轴承上），这种算法将解得复数特征值和特征向量。特征值的实部表示固有频率，虚部是系统稳定性的量度；负值表示系统是稳定的，而正值表示系统是不稳定的。该方法不进行 Sturm 序列检查，因此有可能遗漏一些高频端模态。

阻尼法用于阻尼不能被忽略的问题，如转子动力学研究。该法使用完整矩阵（[K]、[M]）及阻尼阵（[C]）。阻尼法采用 Lanczos 算法并计算得到复数特征值和特征向量。此法不能用 Sturm 序列检查。因此，有可能遗漏所提取频率的一些高频端模态。

QR 阻尼法同时具有 Block Lanczos 法与 Hessenberg 法的优点，最关键的思想是，以线性合并无阻尼系统少量数目的特征向量近似表示前几阶复阻尼特征值。采用实特征值求解（Block Lanczos 法）无阻尼振型之后，运动方程将转化到模态坐标系。然后，采用 QR 阻尼法，一个相对较小的特征值问题就可以在特征子空间中求解出来了。该方法能够很好地求解大阻尼系统模态解，阻尼可以是任意阻尼类型，即无论是比例阻尼或非比例阻尼。由于该方法的计算精度取决于提取的模态数目，因此建议提取足够多的基频模态，特别是阻尼较大的

系统更应当如此，这样才能保证得到好的计算结果。该方法不建议用于提取临界阻尼或过阻尼系统的模态。该方法输出实部和虚部特征值（频率），但仅仅输出实特征向量（模态振型）。

超节点（Supernode）方法主要用于在一次计算中求解很多模态（最大达到 10000）的情况。

变分技术（Variational Technology，VT）是 ANSYS 的专利技术。过去，人们进行 What-if 研究时，需要对大量样本进行计算，形成整个设计空间的响应面。而采用 VT 技术，只需“一次求解”就可以得到整个设计空间的响应面。而且无论设计变量有多少，这“一次求解”的时间都是普通有限元求解的 5 倍左右。因此，设计变量越多，VT 技术的优势越明显。VT 技术实际上是深入到 CAE 程序内核，将 CAE 矩阵（刚度阵、质量阵等）的各元素改造成设计变量的函数（经典 CAE 中各矩阵的元素是数值），把 CAE 分析过程从“数值计算”改造成“函数计算”，计算结果也自然是设计变量的函数。因此，只需“一次求解”就可以得到整个设计空间的响应面。

● Number of Modes to Extract（MODOPT）

模态提取方法都必须设置此选项。在采用 Unsymmetric 法和 Damped 法时，要求提取比必要阶数更多的模态，但此举通常会消耗更多的求解时间。

● Number of Modes to Expand（MXPAND）

此选项在采用 Unsymmetric 法、Damped 法时必须设置。如果想得到单元求解结果，则无论采用何种模态提取方法都需要打开“Calcucate elem results”项。在用单点响应谱分析（SPOPT，SPRS）和动力学设计分析方法（SPOPT，DDAM）中，模态扩展可能要放在谱分析之后按命令 MXPAND 设置的重要性因子 SIGNIF 数值有选择地进行。如果要在谱分析后才进行模态扩展，则在模态分析选项（MODOPT）对话框的模态扩展（EXPAND）选项处选 NO。

● Mass Matrix Formation（LUMPM）

使用该选项可以选定采用默认的质量矩阵形成方式或集中质量矩阵近似方式。对于某些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁和非常薄的壳，采用集中质量矩阵近似通常可以产生良好的效果。

● Prestres Effects Calculation（PSTRES）

使用该选项可以计算有预应力结构的模态，默认的分析过程并不包含预应力。

（3）在模型上施加载荷

在典型的模态分析中位移有效的载荷是零位移约束。如果指定了 1 个非零位移约束，程序将以零位移约束替代该非零位移约束。

Command：D

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement

注意：其他类型的载荷如压力、温度、加速度等可以在模态分析中指定，但在模态提取时将被忽略。程序会计算出相应于所加载荷的载荷向量，并将这些向量写到振型文件 Jobname.MODE 中以便在模态叠加法谐响应分析或瞬态分析中使用。

（4）指定载荷步选项

模态分析中唯一可用的载荷步选项是阻尼选项，见表 4-2。

表 4-2 载荷步选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
Alpha（mass）Damping	ALPHAD	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient
Beta（stiffness）Damping	BETAD	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient
Constant Damping Ratio	DMPRAT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient
Material-Dependent Damping Ratio	MP，DAMP	Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Other｜Change Mat Props｜Temp Dependent｜Polynominal

阻尼只在有阻尼的模态提取法中使用，在其他模态提取法中阻尼将被忽略。如果模态分析存在阻尼并指定阻尼模态提取方法，那么计算出的特征值将是复数解。

注意：如果在模态分析后将进行单点响应谱分析，则在这样的无阻尼模态分析中可以指定阻尼。虽然阻尼并不影响特征值解，但它将被用于计算每个模态的有效阻尼比，此阻尼比将用于计算谱产生的响应。

（5）参与系数表输出

参与系数表可以列表显示出提取的每个模态的参与系数、模态系数和质量分布百分数。在总体直角坐标系的三个轴向和转动方向上，均假定施加单位位移谱激励，就可以计算出参与系数和模态系数。同时，列表显示缩减质量分布。当使用实特征值模态提取方法（如子空间法、Block Lanczos 法或 QR 阻尼法）进行模态分析时，将计算转动参与系数。

注意：可以执行*GET 命令获取一个参与系数或模态系数。参与系数或模态系数适用于在最后应用的坐标系（3D 分析绕 Z 轴旋转）方向上定义的激励（假定为单位位移谱）。为了获取其他方向上的参与系数或模态系数，在指定方向上（SED）定义激励谱，执行谱分析，然后执行*GET 命令获取一个参与系数或模态系数。

（6）存储文件

Command：SAVE

GUI：Utility Menu｜File｜Save As

（7）开始求解计算

Command：SOLVE

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS

求解器的输出内容主要是结构的固有频率，程序将其写到输出文件 Jobname.OUT 和振型文件 Jobname.MODE 中。

（8）退出求解器

Command：FINISH

GUI：Main Menu | Finish

3．扩展模态



如果需要在 POST1 后处理器中观察求解结果，就必须首先扩展振型，即将振型写入结果文件，其主要步骤如下。

提示：扩展振型时文件 Jobname.MODE、Jobname.EMAT、Jobname.ESAV 和 Jobname.TRI 必须存在。

（1）再次进入求解器

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

（2）激活扩展处理及相关选项

Command：EXPASS

GUI：Main Menu | Solution | Analysis Type | ExpansionPass

选择 ON（打开）。

Command：MXPAND

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | ExpansionPass | Expand Modes

选项：Number of Modes to Expand ［MXPAND，NMODE］

指定要扩展的模态数。记住，只有经过扩展的模态可在后处理器中进行观察。默认为不进行模态扩展。

选项：Frequency Range for Expansion ［MXPAND，FREQB，FREQE］

这是另一种控制要扩展的模态数的方法。如果指定了一个频率范围，那么只有该频率范围内的模态会被扩展。

选项：Stress Calculations On/Off ［MXPAND，Elcalc］

如果准备在模态分析后进行谱分析并对产生谱的应力和力感兴趣，则打开（ON）此选项。模态分析中的“应力”并不代表结构中的实际应力，而只是给出一个各阶模态之间相对的应力分布的概念。默认为不计算应力。

（3）指定载荷步选项

在模态扩展中唯一有效的选项就是输出控制选项。

- Printed output

此选项可以用来控制输出文件 Jobname.OUT 中所包含的数据结果，包括扩展得到的振型、应力和力。

Command：OUTPR

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout

- Database and results file output

此选项用来控制结果文件 Jobname.RST 所包含的数据。

Command：OUTRES

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | DB/Results File

（4）开始扩展处理

Command：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

（5）退出求解器

Command：FINISH

GUI：Main Menu | Finish

4．观察求解结果

模态分析的结果，即模态扩展的结果被写到结果文件中，其结果数据包括结构的固有频率、已扩展的振型、相对的应力和力分布等。

（1）注意要点

如要在 POST1 中观察结果，则数据库中必须包含和求解时相同的模型。

结果文件 Jobname.RST 必须存在。

（2）观察结果数据的过程

读入合适子步的结果数据。每阶模态在结果文件中被存为一个单独的子步。例如，扩展了 6 阶模态，结果文件中将有由 6 个子步组成的一个载荷步。

Command：SET

GUI：Main Menu | General Postproc | Read Results

（3）列表显示所有频率

用于列出所有已扩展模态对应的频率。

Command：SET，LIST

GUI：Main Menu | General Postproc | List Results

（4）图形显示变形

Command：PLDISP

GUI：Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape

用 PLDISP 命令的 KUND 域可设置将未变形形状叠加在显示结果中。

（5）线单元结果

Command：ETABLE

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

对于线单元，如梁、桁条和管子，可以用 ETABLE 命令获得导出数据（应力、应变等）。结果数据通过一个标识字和一个 ETABLE 命令中的顺序号或部件名组合起来加以区分。

（6）等值图显示结果

Command：PLNSOL 或 PLESOL

GUI：Main Menu | General PostProc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu

Main Menu | General PostProc | Plot Results | Contour Plot | Element Solu

使用这些选项可绘制几乎所有结果的等值线图，如应力（SX，SY，SZ…）、应变（EPELX，EPELY，EPELZ…）和位移（UX，UY，UZ…）。

PLNSOL 和 PLESOL 命令的 KUND 项可用来设置将未变形形状叠加在显示结果中。

绘制单元表数据和线单元数据的等值线：

Command：PLETAB，PLLS

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Element Table｜Plot Elem Table
Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Line Elem Res

注意：命令 PLNSOL 会对节点处的导出数据如应力和应变取平均值。这种平均会导致在不同材料单元、不同的壳厚度或其他不连续位置处的节点上出现“污损”值。为了避免出现这种污损效应，在使用命令 PLNSOL 前应首先使用选择功能，例如选中同种材料的单元、同样厚度的壳等。

（7）列表显示结果
Command：PRNSOL（节点结果）
Command：PRESOL（一个单元接一个单元的结果）
Command：PRRSOL（反作用数据等）
GUI：Main Menu｜General Postproc｜List Results｜solution option
Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Sorted Listing｜Sort Nodes 或 Sort Elems
用 NSORT 和 ESORT 命令可在列表之前对数据进行排序。

4.1.2 谐响应分析

1．谐响应分析概述

谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时其稳态响应的一种技术。其分析目的是计算出结构在几种频率下的响应，并得到响应值和频率的变化关系曲线。这种分析技术只是计算结构的稳态受迫振动，发生在激励开始时的瞬态振动不在谐响应分析中考虑，如图 4-1 所示。

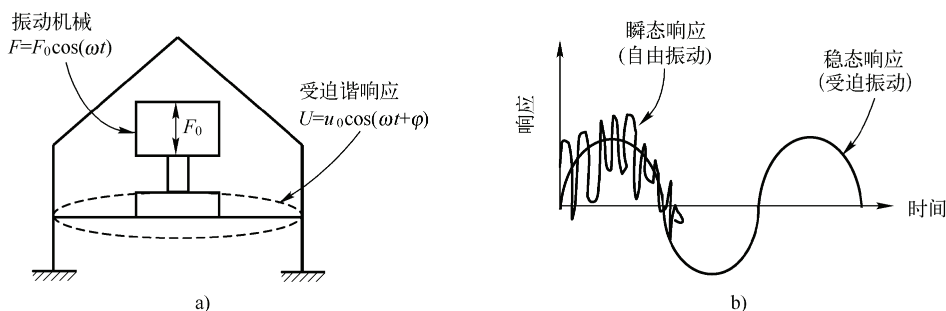


图 4-1 谐响应分析图

a) 典型的谐响应系统 b) 结构的瞬态和稳态动力响应

和模态分析相同，谐响应分析也属于线性分析，任何非线性特性，即使被定义在分析过程中也将被忽略。但在分析中可以包含非对称矩阵，如分析流体-结构耦合作用的问题。谐响应分析同样可以用于分析有预应力的结构。

谐响应分析可以采用 5 种方法：Full（完全法）、Mode Superposition（模态叠加法）、VT Full 法、VTPA Full 法以及 VTRU Full 法。下面主要针前两种方法进行比较分析。

（1）Full 法

Full 法是 5 种方法中最容易使用的方法。它采用完整的系统矩阵计算谐响应，矩阵既可

以是对称的，也可以是非对称的。Full 法的优点是：

1）容易使用，因为不必关心如何选取主自由度或振型。

2）使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似。

3）允许有非对称矩阵，这种矩阵在声学或轴承问题中很典型。

4）用单一处理过程计算出所有的位移和应力。

5）允许定义各种类型的载荷：节点力、外加的（非零）位移、单元载荷（压力和温度）。

6）允许在实体模型上定义载荷。

Full 法的缺点是：

1）预应力选项不可用。

2）在采用 JCG 求解器或 ICCG 求解器时，Full 法的效率不高。

（2）Mode Superposition 法

Mode Superposition 通常通过模态分析得到的振型（特征向量）乘以因子并求和来计算结构的响应。它的优点是：

1）模态分析中施加的载荷可以通过 LVSCALE 命令用于谐响应分析中。

2）可以使求解按照结构的固有频率聚集，可得到更平滑、更精确的响应曲线图。

3）可以包含预应力效果。

4）允许考虑振型阻尼（阻尼系数为频率的函数）。

Mode Superposition 法的缺点是不能施加非零位移。

谐响应的 5 种方法存在以下共同的局限性：

1）所有载荷必须随时间按正弦规律变化。

2）所有载荷必须有相同的频率。

3）不允许有非线性特性。

4）不计算瞬态效应。

2．谐响应分析步骤

谐响应分析过程主要包含建模、加载求解及观察求解结果 3 个主要步骤，下面分别进行详细阐述。

（1）建模

谐响应分析的建模过程与其他分析的建模过程类似，即首先定义工作文件名和工作标题，然后定义单元类型、单元实常数和材料特性，最后建立有限元模型。但在谐响应分析建模过程中应注意以下两个问题：

1）谐响应分析中只有线性行为是有效的，如果在分析中指定了非线性单元，程序在计算过程中将忽略其非线性行为并将该单元作为线性单元处理。

2）在谐响应分析中，材料的性质可以是线性的、非线性的、恒定的或与温度相关的。在分析中必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS，但非线性性质将被忽略。

（2）加载求解

1）进入 ANSYS 求解器。

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution



2）定义分析类型及分析选项。

表 4-3 是谐响应分析中可以使用的选项。

表 4-3　分析类型和分析选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis
Analysis Type：Harmonic	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis｜Harmonic
Solution Method	HROPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Solution Listing Format	HROUT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Mass Matrix Formulation	LUMPM	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Equation Solver	EQSLV	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Sol'n Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Sol'n Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options

● New Analysis（ANTYPE）

选择 New Analysis，在谐响应分析中 Restart 不可用，如果需要施加其他谐载荷，可以进行一次新的分析。

● Analysis Type（ANTYPE）

此选项用于指定分析类型，应选择 Harmonic Response。

● Soluion Method（HROPT）

此选项用于指定谐响应分析方法，在 Full 法、Mode Superposition 等 5 种分析方法中选择一种。

● Solution Listing Format（HROUT）

此选项用于确定输出文件 Jobname.Out 中谐响应分析的位移解列出的格式。可以选择的方式有：“real and imaginary”（实部和虚部）形式，“amplitudes and phase angles”（幅值和相位角）形式，默认形式为“real and imaginary”（实部和虚部）形式。

● Mass Matrix Formulation（LUMPM）

此选项用于指定是采用默认的分布质量矩阵（取决于单元类型）还是集中质量矩阵。建议在大多数应用中采用默认的分布质量矩阵。但对于某些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁或非常薄的壳，集中质量近似矩阵经常能产生较好的结果。另外，集中质量近似矩阵可以减少运行时间并降低内存要求。

● Equation Solver（EQSLV）

可以使用下列求解器中的任何一个：

① Sparse direct equation（SPAR）solver

② Jacobi Conjugate Gradient（JCG）solver

③ JCG out-of-memory solver

④ Incomplete Cholesky Conjugate Gradient（ICCG）solver

⑤ Quasi-Minimal Residual iterative equation（QMR）solver

⑥ Preconditioned Conjugate Gradient（PCG）solver

对大多数谐响应分析，建议采用 Sparse direct equation（SPAR）solver。

3）在模型上加载。

指定一个完整的简谐载荷需要输入以下 3 条信息：Amplitude（幅值）、Phase Angle（相位角）和 Forcing Frequency Range（强制频率范围）。

提示：谐响应分析不能计算频率不同的多个强制载荷共同作用时产生的响应，但在 POST1 后处理器中可以对两种载荷状况进行叠加以得到总体响应。

4）载荷步选项。

谐响应分析可用的载荷步选项见表 4-4。

表 4-4　载荷步选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
Number of Harmonic Solution	NSUBST	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc
Stepped or Ramped Loads	KBC	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc
Forcing Frequency Range	HARFRQ	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Freq and Substeps Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Freq and Substeps
Damping	ALPHAD BETAD	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping
Printed Output	OUTPR	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜Solu Printout Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜Solu Printout
Database and Results File Output	OUTRES	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜DB/Results File Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜DB/Results File
Extrapolation of Results	ERESX	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜Integration Pt Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Output Ctrls｜Integration Pt

5）存储文件。

Command：SAVE

GUI：Utility Menu｜File｜Save As

6）开始求解计算。

Command：SOLVE

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS

如果有另外的载荷和频率范围，可重复 3）～5）步。如果要在 POST26 后处理器中查看求解结果，则一个载荷步和另一个载荷步的频率范围不能重叠。

7）退出求解器。

Command：FINISH

GUI：Main Menu｜Finish

（3）观察求解结果

谐响应分析结果保存到结果文件 Jobname.RST 中。如果结构定义了阻尼，响应将与载荷异步，所有结果将是复数形式的，并以实部和虚部形式存储。

通常可以用 POST26 和 POST1 观察结果。一般的处理顺序是首先用 POST26 后处理器找到临界强制频率（模型中所关注的点产生最大位移时的频率），然后用 POST1 后处理器在此临界频率处处理整个模型。

使用 POST1 和 POST26 后处理器的方法和模态分析类似。

4.1.3 瞬态动力学分析

1．瞬态动力学分析概述

瞬态动力学分析是用于确定结构承受任意随时间变化载荷的动力学响应的一种方法。瞬态动力学分析可以确定结构在静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力及力。载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较显著。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态动力学分析。

瞬态动力学分析可以采用两种方法：Full（完全法）及 Mode Superposition（模态叠加法）。

（1）Full 法

Full 法采用完整的系统矩阵计算结构瞬态响应，允许包含各类非线性特性（塑性、大变形、大应变等）。

（2）Mode Superposition 法

Mode Superposition 法通常通过模态分析得到的振型（特征向量）乘以因子并求和来计算结构的响应。

2．瞬态动力学分析步骤

瞬态动力学分析过程主要包含建模、加载求解及观察求解结果 3 个主要步骤。

（1）建模

瞬态动力学分析的建模过程与其他分析的建模过程类似，即首先定义工作文件名和工作标题，然后定义单元类型、单元实常数和材料特性，最后建立有限元模型。但在瞬态动力学分析中建模应注意以下两个问题：

- 可以使用线性和非线性单元。
- 必须指定弹性模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量），材料的性质可以是线性的、非线性的、恒定的或与温度相关的。但非线性材料特性将被忽略。

（2）加载求解

1）进入 ANSYS 求解器。

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

2）定义分析类型及分析选项。

表 4-5 是瞬态动力学分析中可以使用的选项。

表 4-5　分析类型和分析选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis
Analysis Type：Transient	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis｜Transient
Solution Method	TRNOPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜New Analysis Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Large Deformation Effects	NLGEOM	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Mass Matrix Formulation	LUMPM	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Equation Solver	EQSLV	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Sol'n Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Sol'n Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Stress Stiffening Effect	SSTIF	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Newton-Raphson Option	NROPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options

- New Analysis（ANTYPE）

若要进行新的分析，选择 New Analysis；若想重启动一次失败的非线性分析，则选择 Restart。

- Analysis Type（ANTYPE）

此选项用于指定分析类型，应选择 Transient。

- Solution Method（TRNOPT）

此选项用于指定瞬态动力学的分析方法，可选择 Full 法及 Mode Superposition 法两种分析方法中的一种。

- Large Deformation Effects（NLGEOM）

在分析中存在大变形（细长杆的弯曲）和大应变（金属成形）时，选择 ON，默认值为 OFF。

- Mass Matrix Formulation（LUMPM）

使用该选项可以选定采用默认的质量矩阵形成方式或集中质量矩阵近似方式。通常选择质量矩阵形成方式，但对于某些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁和非常薄的壳，采用集中质量矩阵近似通常可以产生良好的效果。

- Equation Solver（EQSLV）

可以使用下列求解器中的任何一个：

① Sparse direct equation（SPAR）solver

② Jacobi Conjugate Gradient（JCG）solver

③ JCG out-of-memory solver

④ Incomplete Cholesky Conjugate Gradient（ICCG）solver

⑤ Quasi-Minimal Residual iterative equation（QMR）solver

⑥ Preconditioned Conjugate Gradient（PCG）solver

⑦ Iterative（程序自动检测，仅对线性静态分析和完全瞬态结构分析有效）

- Stress Stiffening Effect（SSTIF）

应力刚化属于几何非线性，在下列情况下选择 ON：

- 在小变形分析中希望结构中的应力能显著增加或降低结构的刚度，如承受法向压力的圆形薄膜。
- 在大变形分析中需要用此选项帮助收敛。

- Newton-Raphson Option（NROPT）

此选项用于指定求解期间切割矩阵被刷新的频度。

3）在模型上加载。

瞬态动力学分析包含随时间变化的载荷，要指定这样的载荷，需将载荷对时间的关系曲线划分成合适的载荷步。在载荷时间曲线上的每个“拐角”都应作为一个载荷步，如图 4-2 所示。

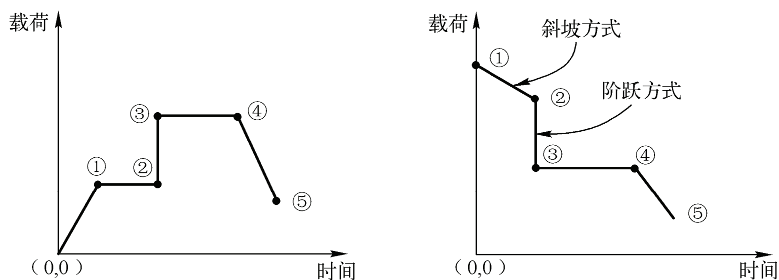


图 4-2　载荷-时间关系曲线示意图

第 1 个载荷步通常被用来建立初始条件，然后再指定后续的瞬态载荷及加载步选项。对于每一个载荷步，都要指定载荷值和时间值，同时要指定其他的载荷步选项，例如载荷是按照阶跃方式（Stepped）还是按照斜坡方式（Ramped）施加，是否使用自动时间步长等，最后将每一个载荷步写入文件并一次性求解所有的载荷步。

- 施加初始条件

施加瞬态载荷的第 1 步是建立初始关系（零时刻的情况）。瞬态动力学分析要求给定两种初始条件：初始位移和初始速度，如果没有进行特别设置，这两项都被假定为 0，可以通过在一个较小的时间间隔内施加合适的位移载荷来指定非零的初始速度。

非零初始位移及非零初始速度的设置：

Command：IC

GUI：Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define

- 施加瞬态载荷

表 4-6 列出了适用于瞬态动力学分析的载荷。

表 4-6 瞬态动力学分析中可施加的载荷

载荷形式	类型	命令	GUI 途径
Displacement（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）	约束	D	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Displacement Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Displacement
Force，Moment（FX，FY，FZ，MX，MY，MZ）	力	F	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment
Pressure（PRES）	面载荷	SF	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure
Temperature（TEMP），Fluence（FLUE）	体载荷	BF	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Temperature Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Temperature
Gravity，Spinning 等	惯性载荷	ACEL OMEGA DOMEGA	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Inertia Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Inertia

4）载荷步选项。

瞬态动力学分析可用的载荷步选项见表 4-7～表 4-10。

表 4-7 普通载荷步选项

选项	命令	GUI 途径
Time	TIME	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc
Stepped or Ramped Loads	KBC	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc
Integration Time Step	NSUBST DELTIM	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc
Automatic Time Stepping	AUTOTS	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Basic Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc

表 4-8 动力学选项

选项	命令	GUI 途径
Time Integration Effects	TIMINT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Time Integration｜Newmark Parameters Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Time Integration｜Newmark Parameters
Transient Integration Para meters	TINPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Time Integration｜Newmark Parameters Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Time Integration｜Newmark Parameters

（续）

选　　项	命　　令	GUI 途径
Damping	ALPHAD BETAD	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Transient Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Time/Frequenc | Damping Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Transient Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Damping

表 4-9　非线性选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
Max. No. of Equilibrium iterations	NEQIT	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Equilibrium Iter Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Equilibrium Iter
Convergence Tolerances	CNVTOL	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Convergence Crit Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Convergence Crit
Predictor-Corrector Option	PRED	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Predictor Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Predictor
Line Search Option	LNSRCH	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Line Serach Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Nonlinear Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Line Serach
Creep Criteria	CRPLIM	Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Creep Criterion Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Creep Criterion
Solution Termination Option	NCNV	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Advanced NL Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Nonlinear | Criteria to Stop Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Advanced NL Main Menu | Solution | Load Step Opts | Nonlinear | Criteria to Stop

表 4-10　输出控制选项

选　　项	命　　令	GUI 途径
Printed Output	OUTPR	Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout
Database and Results File Output	OUTRES	Main Menu | Preprocessor | Loads | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Output Ctrls | DB/Results File Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls | Basic Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | DB/Results File
Extrapolation of Results	ERESX	Main Menu | Preprocessor | Loads | Load Step Opts | Output Ctrls | Integration Pt Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Integration Pt

5）存储文件。

Command：SAVE

GUI：Utility Menu｜File｜Save As

6）开始求解计算。

Command：SOLVE

GUI：Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS

7）退出求解器。

Command：FINISH

GUI：Main Menu｜Finish

（3）观察求解结果

瞬态动力学分析结果被保存到结果文件 Jobname.RST 中。可以使用 POST1 和 POST26 后处理器对结果进行观察。

4.1.4 谱分析

1．谱分析概述

谱分析是一种将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算结构的位移和应力的分析技术。它主要用于时间-历程分析，以便确定结构对随机载荷或随时间变化载荷的动力响应情况，如地震、飓风、海洋波浪、火箭发动机振动等。

所谓谱，是指谱值与频率之间的关系图，它反映了时间-历程载荷的强度和频率。谱分析主要有以下 3 种形式。

- 响应谱：包括单点响应谱（SPRS）和多点响应谱（MPRS）。
- 动力设计分析方法（DDAM）。
- 功率谱密度（PSD）。

一个响应谱单自由度系统是对一个时间-历程载荷函数的响应，它是一个响应与频率的关系图，其中响应可以是位移、速度、加速度、力等。响应谱主要由以下两种形式组成。

（1）单点响应谱（SPRS）

可以在模型的一个点集上定义不同的响应谱曲线，如图 4-3a 所示。

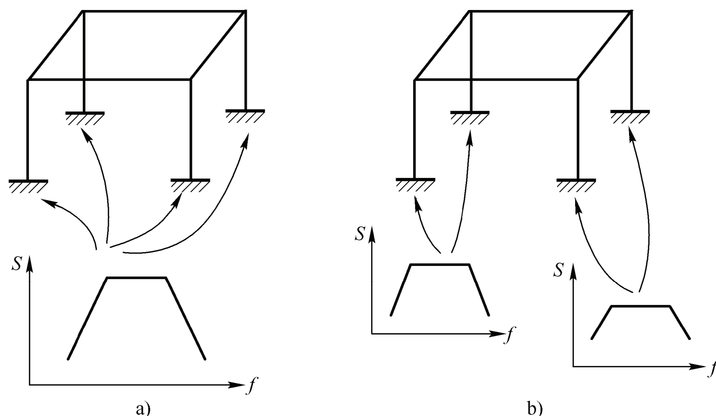


图 4-3　单点响应谱和多点响应谱

（2）多点响应谱（MPRS）

可以在模型不同的点集上定义不同的响应谱曲线，如图 4-3b 所示。

（3）功率谱密度（PSD）



功率谱密度是结构对随机动力载荷的概率统计，主要用于随机振动分析，描述功率谱密度和频率的关系曲线。功率谱密度可以分为位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式。与响应谱分析类似，随机振动分析也可以是单点的或多点的。在单点随机振动分析时，要求在模型的不同点集上指定不同的功率谱密度。

2．单点响应谱分析步骤

单点响应谱分析主要有以下 6 个步骤：

- 建立模型
- 获得模态解
- 获得谱分析解
- 扩展模态
- 合并模态
- 查看求解结果

（1）建立模型

与其他分析类型的建模过程类似，主要包括定义工作文件名、工作标题、单元类型、单元实常数、材料性质以及模型的几何形状，需要注意以下两点：

- 谱分析中只有线性行为是有效的，如果在分析中指定了非线性单元，程序在计算过程中将忽略其非线性行为并将该单元作为线性单元处理。
- 在谱分析中，材料的性质可以是线性的、非线性的、恒定的或与温度相关的。在分析中必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS，但非线性性质将被忽略。

（2）获得模态解

结构的模态解是谱分析所必需的。关于模态分析的具体步骤可参阅 4.1.1 小节内容，应注意以下 4 个问题：

- 必须使用子空间（Subspace）法及 Block Lanczos 法提取模态，其他模态提取方法对后续的谱分析是无效的。
- 必须在施加激励谱的位置添加自由度约束。
- 材料的阻尼特性必须在模态分析中指定。
- 所提取的模态数应足以表征在感兴趣的频率范围内结构所具有的响应。

（3）获得谱分析解

1）进入求解器。

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

2）定义分析类型和分析选项。

表 4-11 列出了谱分析中的选项。

表 4-11 分析类型和分析选项

选 项	命 令	GUI 途径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis
Analysis Type：Spectrum	ANTYPE	Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis｜Spectrum
Spectrum Type：SPRS	SPOPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options
Number of Mode to Use for Solution	SPOPT	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Analysis Options Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options

● New Analysis（ANTYPE）

选择 New Analysis。

● Analysis Type（ANTYPE）

此选项用于指定分析类型，应选择 Spectrum。

● Spectrum Type（SPOPT）

选择单点响应谱。

● Number of Mode to Use for Solution（SPOPT）

此选项用于定义模态扩展数，应定义足够的模态扩展数，要足以覆盖谱所决定的频率范围，并足够表征结构的响应特性。求解的精度取决于模态数，一般是模态数越大，则求解精度越高。如果要计算单元应力，则必须将 SPOPT 命令选项设置为 YES 状态。

3）定义载荷步选项。

对于单点响应谱而言，可以使用的载荷步选项见表 4-12 和表 4-13。

表 4-12 载荷步分析选项（谱选项）

选 项	命 令	GUI 途径
Type of Response Spectrum	SVTYP	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single Point｜Settings Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single Point｜Settings
Excitation Direction	SED	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single Point｜Settings Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single point｜Settings
Spectra value vs Frequency Curve	FREQ,SV	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single point｜Freq Table Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Spectrum｜Single point｜Freq Table

表 4-13 载荷步分析选项（阻尼选项）

选 项	命 令	GUI 途径
Beta（Stiffness）Damping	BETAD	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient
Constant Damping Ratio	DMPART	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls｜Transient
Modal Damping	MDAMP	Main Menu｜Preprocessor｜Loads｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping Main Menu｜Solution｜Load Step Opts｜Time/Frequenc｜Damping

4）存储文件。

Command：SAVE

GUI：Utility Menu | File | Save As



5）开始求解计算。

Command：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

6）若要获得更多的响应谱，重复 3）～5）步即可。

7）退出求解器。

Command：FINISH

GUI：Main Menu | Finish

（4）扩展模态

Command：MXPAND

GUI：Main Menu | Solution | Load Step Opts | Expansion Pass | Single Expand | Expand Modes

（5）合并模态

合并模态作为一个独立的求解阶段，包括以下步骤。

1）进入求解器。

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

2）定义分析类型。

Command：ANTYPE

GUI：Main Menu | Solution | New Analysis

3）选择模态合并方法。

对于单点响应谱分析，ANSYS 提供了 5 种模态合并方法：

- Square Root of Sum of Squares（SRSS）
- Complete Quadratic Combination（CQC）
- Double Sum（DSUM）
- Grouping（GRP）
- Naval Research Laboratory Sum（NRLSUM）

其中，NRLSUM 法是单点响应谱分析的一种典型方法。

4）开始求解。

Command：SOLVE

GUI：Main Menu | Solution | Solve | Current LS

5）退出求解器。

Command：FINISH

GUI：Main Menu | Finish

（6）查看求解结果

单点响应谱分析的结果存储于模态合并文件 Jobname.MCOM 中，包括总位移、总速度、总加速度、总应力、总应变及总反作用力等。

使用 POST1 进行结果后处理的基本过程类似于其他类型的结果后处理过程，这里不再赘述。

4.2 模态分析实例详解——飞机机翼模态分析

4.2.1 问题描述

图 4-4 为一飞机机翼结构示意图，试对其进行模态分析。

机翼材料的弹性模量 E=69GPa，泊松比ν=0.26，密度ρ=2700kg/m^3。

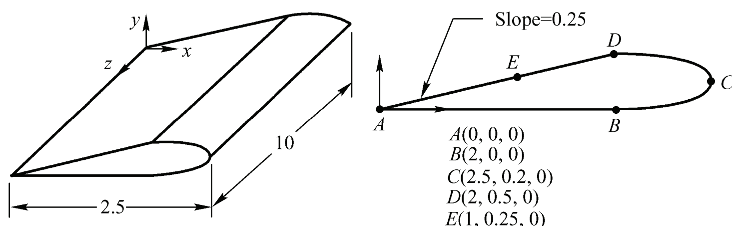


图 4-4　飞机机翼结构示意图

4.2.2 问题分析

该问题属于模态分析问题。选择 Block Lanczos 方法进行模态分析，采用 PLANE182 及 SOLID185 单元建模求解。

4.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 MODAL ANALYSIS OF A WING，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid　Quad 4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 4-5 所示，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid　Brick 8 node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Defined Element Types 列表框中选择 Type 2　SOLID185，单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 SOLID185 element type options 对话框，在 Element technology

K2 下拉选框中选择 Simple Enhanced Strn，其余选项采用默认设置，如图 4-6 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

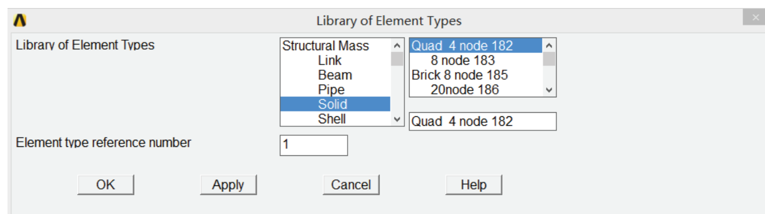


图 4-5 单元类型列表对话框

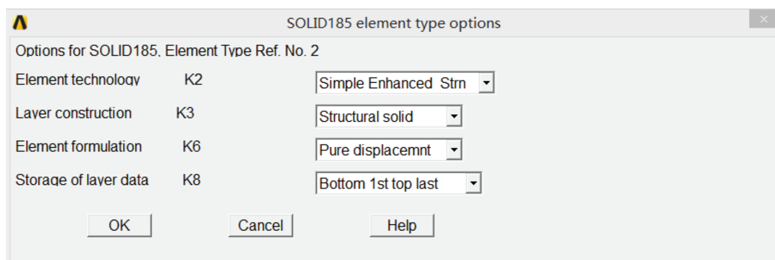


图 4-6 SOLID185 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Propeties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 6.9E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Density 选项，出现 Density for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 2.7E3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中输入 0、0、0，如图 4-7 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

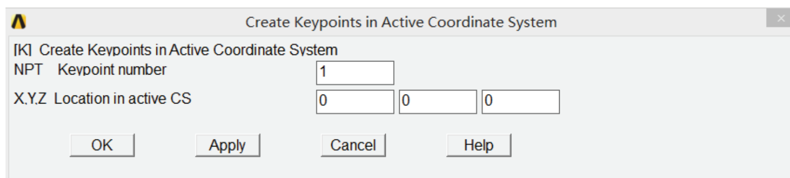


图 4-7 创建关键点对话框

2）参照上一步的操作过程，创建以下关键点：2（2，0，0）；3（2.5，0.2，0）；4（2，0.5，0）；5（1，0.25，0）。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 5，1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Splines | With Options | Spline thru KPs 命令，出现 B-Spline 拾取菜单，在输入栏中输入 2，3，4，5，单击 OK 按钮，出现 B-Spline 对话框，参照图 4-8 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

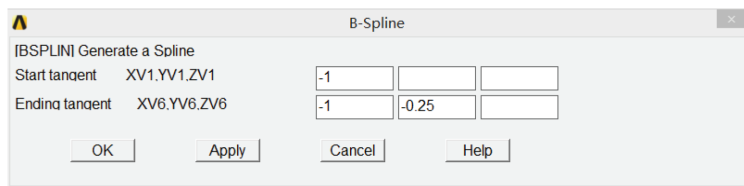


图 4-8　创建样条曲线对话框

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create Areas by Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过线段生成面。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE　Element edge length 输入栏中输入 0.1，如图 4-9 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

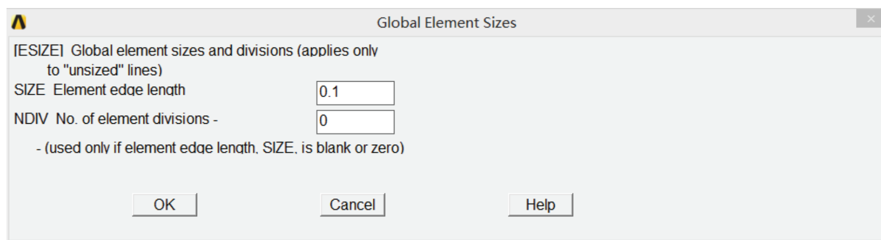


图 4-9　单元尺寸设置对话框

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

8）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 4-10 所示。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE　Element edge length 输入栏中输入 0，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置线段等分数。

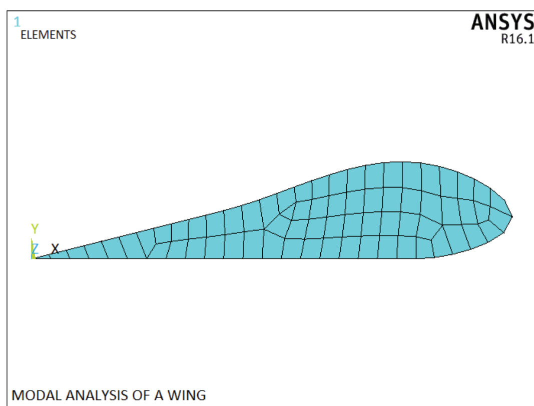


图 4-10　网格划分结果显示

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Operate | Extrude | Elem Ext Opts 命令，出现 Element Extrusion Options 对话框，在[TYPE]　Element type number 下拉菜单中选择 2 SOLID185，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Operate | Extrude | Areas | By XYZ Offset 命令，出现 Extrude Area by Offset 拾取菜单，出现 Extrude Areas by XYZ Offset 对话框，在 DX,DY,DZ　Offsets for extrusion 输入栏中依次输入 0、0、10，如图 4-11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

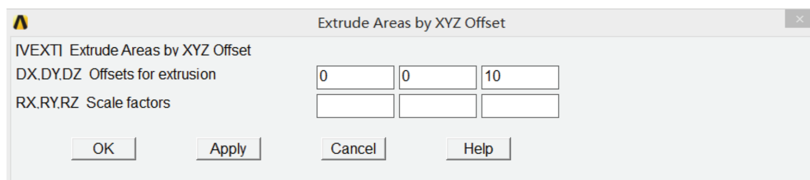


图 4-11　拖拉面生成体对话框

12）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | View Direction 命令，出现 View Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 1、1、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

技巧：此操作的目的是设置视图显示方向，可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

13）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示机翼的有限元模型，如图 4-12 所示。

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，在［ANTYPE］　Type of analysis 选项中选择 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Modal Analysis 对话框，参照图 4-13 对其进行设置，单击 OK 按钮，出现 Block Lanczos Method 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

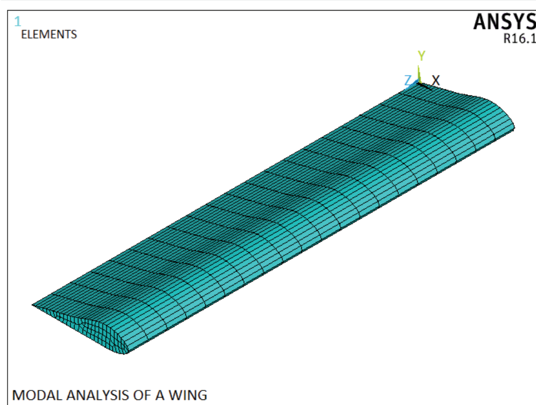


图 4-12　创建的机翼有限元模型

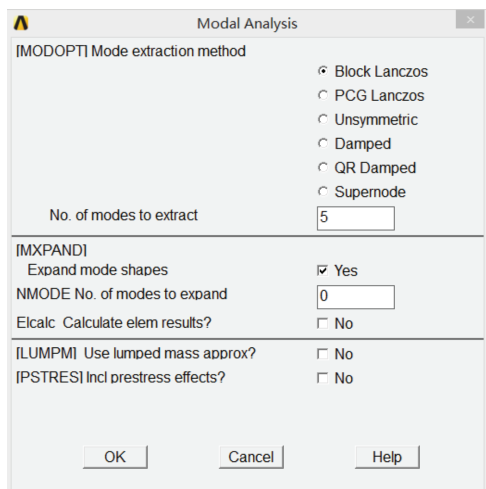
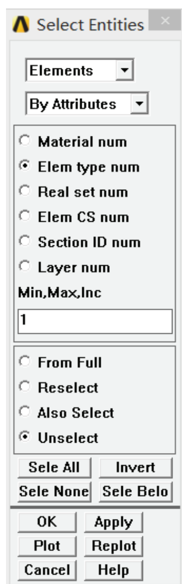


图 4-13　模态分析选项设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Elements，在第 2 个下拉菜单中选择 By Attributes，在第 3 栏中选择 Elem type num，在 Min,Max,Inc 输入栏中输入 1，在第 5 栏中选择 Unselect，如图 4-14a 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a)



b)

图 4-14　选择实体对话框

提示：去除面单元。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，如图 4-14b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Z 坐标为 0 的所有节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 下拉选框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 4-15 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

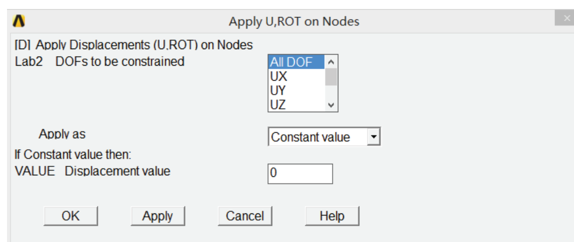


图 4-15 施加位移载荷对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击第 4 栏中的 Sele All 按钮，单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

提示：在求解开始时，若出现 Verify 提示框可单击其上的 Yes 按钮继续求解过程。

9）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | First Set 命令，读取第 1 步求解结果。

提示：若读入网盘附赠资料中的数据文件（.DB 文件），需执行 Main Menu | General Postproc | Data & File Opts 命令读入相应的.rst 结果文件。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将显示提取的第 1 阶模态结果，如图 4-16 所示。

3）选择 Utility Menu｜Animate｜Mode Shape 命令，出现 Animate Mode Shape 对话框，在 No. of frames to create 输入栏中输入 10，在 Time delay（seconds）输入栏中输入 0.5，在 Display Type 列表框中选择 DOF solution Deformed Shape，如图 4-17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将通过动画的方式显示第 1 个模态。

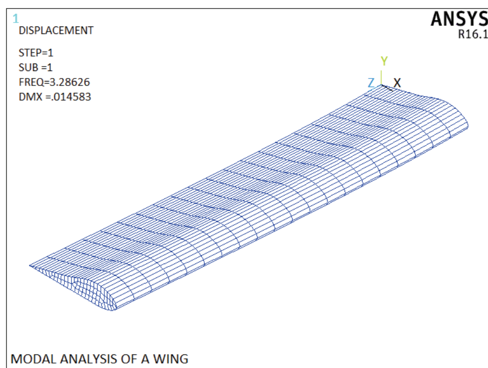


图 4-16　第 1 阶模态提取结果

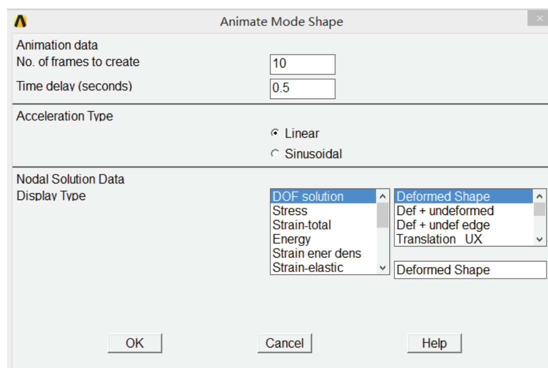


图 4-17　动画显示设置对话框

4）选择 Utility Menu｜Parameters｜Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Modal results，如图 4-18 所示，单击 OK 按钮，出现 Get Modal Results 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 FREQ1，在 Mode number N 输入栏中输入 1，在 Modal data to be retrieved 列表框中选择 Frequency　FREQ，如图 4-19 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

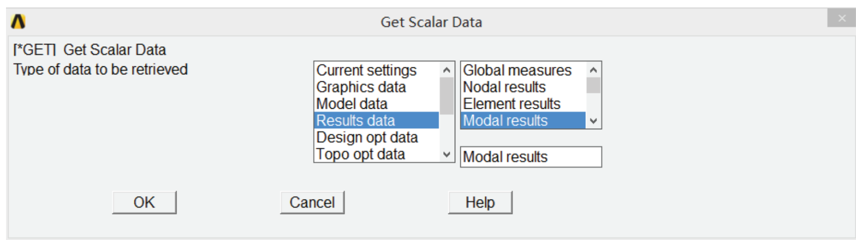


图 4-18　获取参量信息对话框

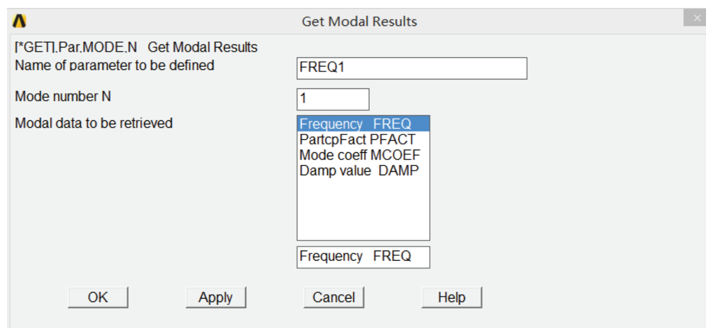


图 4-19　获取模态求解结果信息对话框

5）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Next Set 命令，读取第 2 步求解结果。

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将显示提取的第 2 阶模态结果，如图 4-20 所示。

7）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Modal results，单击 OK 按钮，出现 Get Modal Results 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 FREQ2，在 Mode number N 输入栏中输入 2，在 Modal data to be retrieved 列表框中选择 Frequency FREQ，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Next Set 命令，读取第 3 步求解结果。

9）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将显示提取的第 3 阶模态结果，如图 4-21 所示。

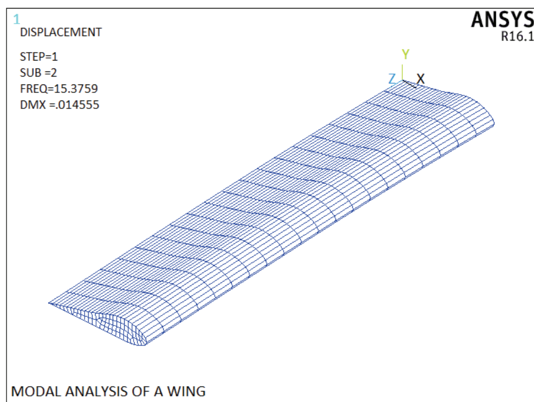


图 4-20　第 2 阶模态提取结果

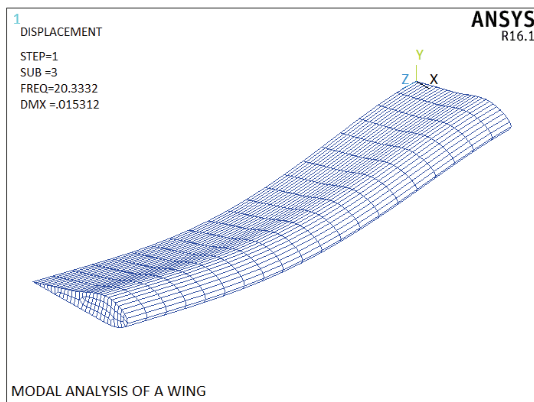


图 4-21　第 3 阶模态提取结果

10）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Modal results，单击 OK 按钮，出现 Get Modal Results 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 FREQ3，在 Mode number N 输入栏中输入 3，在 Modal data to be retrieved 列表框中选择 Frequency FREQ，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Next Set 命令，读取第 4 步求解结果。

12）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将显示提取的第 4 阶模态结果，如图 4-22 所示。

13）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话

框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data Modal results，单击 OK 按钮，出现 Get Modal Results 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 FREQ4，在 Mode number N 输入栏中输入 4，在 Modal data to be retrieved 列表框中选择 Frequency FREQ，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Next Set 命令，读取第 5 步求解结果。

15）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，ANSYS 将显示提取的第 5 阶模态结果，如图 4-23 所示。

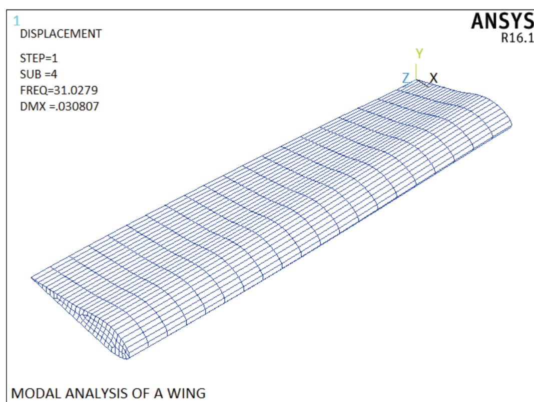


图 4-22　第 4 阶模态提取结果

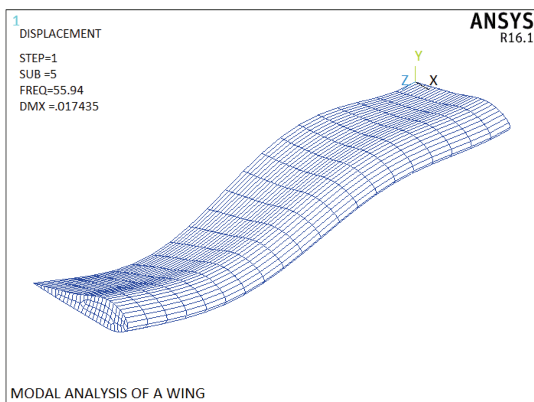
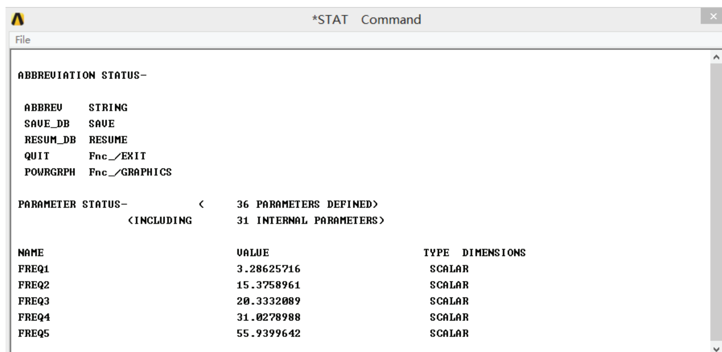


图 4-23　第 5 阶模态提取结果

16）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Modal results，单击 OK 按钮，出现 Get Modal Results 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 FREQ5，在 Mode number N 输入栏中输入 5，在 Modal data to be retrieved 列表框中选择 Frequency FREQ，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Utility Menu | List | Status | Parameters | All Parameters 命令，ANSYS 将列表显示模态频率求解结果，如图 4-24 所示。



*STAT Command

File

```
ABBREVIATION STATUS-

 ABBREV    STRING
 SAVE_DB   SAVE
 RESUM_DB  RESUME
 QUIT      Fnc_/EXIT
 POWRGRPH  Fnc_/GRAPHICS

PARAMETER STATUS-           (      36 PARAMETERS DEFINED)
                 (INCLUDING        31 INTERNAL PARAMETERS)

NAME                              VALUE                       TYPE  DIMENSIONS
FREQ1                             3.28625716                   SCALAR
FREQ2                             15.3758961                   SCALAR
FREQ3                             20.3332089                   SCALAR
FREQ4                             31.0278988                   SCALAR
FREQ5                             55.9399642                   SCALAR
```

图 4-24　列表显示模态频率求解结果

18）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可尝试改变网格尺寸，再进行求解计算，分析比较不同网格密度下求解结果的差别。

4.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                              ! 定义工作文件名
/TITLE，MODAL ANALYSIS OF A WING
                                                 ! 定义工作标题

/PREP7                                           ! 进入 PREP7 前处理器
ET，1，PLANE182                                  ! 指定单元类型
ET，2，SOLID185，，3
MP，EX，1，6.9E10
MP，DENS，1，2700
MP，PRXY，1，0.26
K，1                                             ! 创建关键点
K，2，2
K，3，2.5，0.2
K，4，2，0.5
K，5，1，0.25
L，1，2                                          ! 通过关键点生成线段
L，5，1
BSPLIN，2，3，4，5，，，-1，，，-1，-0.25         ! 生成样条曲线
AL，1，3，2                                      ! 通过线段生成面
ESIZE，0.1                                       ! 设置单元尺寸
AMESH，1                                         ! 对面进行网格划分
ESIZE，，20
TYPE，2
VEXT，ALL，，，，，10                             ! 拖拉面生成体
/VIEW，，1，1，1                                 ! 设置视图显示方向
/ANG，1
/REP
EPLOT
SAVE
FINISH

/SOLU                                            ! 进入求解器
ANTYPE，MODAL                                    ! 指定求解类型
MODOPT，LANB，5                                  ! 模态分析选项设置
ESEL，U，TYPE，，1                               ! 选择单元
NSEL，S，LOC，Z，0                               ! 选择节点
D，ALL，ALL                                      ! 在节点上施加位移约束
NSEL，ALL
SAVE
SOLVE                                            ! 开始求解计算
SAVE
```

```
FINISH

/POST1                                  ！进入 POST1 后处理器
SET，LIST，2
SET，FIRST                              ！读取第 1 步求解结果
PLDISP，0                               ！显示模态
ANMODE，10，0.5E-1                      ！动画显示模态
*GET，FREQ1，ACTIVE，0，SET，FREQ
SET，NEXT
PLDISP，0
ANMODE，10，0.5E-1
*GET，FREQ2，ACTIVE，0，SET，FREQ
SET，NEXT
PLDISP，0
ANMODE，10，0.5E-1
*GET，FREQ3，ACTIVE，0，SET，FREQ
SET，NEXT
PLDISP，0
ANMODE，10，0.5E-1
*GET，FREQ4，ACTIVE，0，SET，FREQ
SET，NEXT
PLDISP，0
ANMODE，10，0.5E-1
*GET，FREQ5，ACTIVE，0，SET，FREQ
*STAT                                           ！列表显示参量信息
FINISH
/EXIT，ALL                                        ！退出 ANSYS
```

4.3 模态分析实例详解——谐振器模态分析

4.3.1 问题描述

图 4-25 为一长方体无损耗空腔谐振器，试对其进行模态分析。

材料参数如下。

相对磁导率：μ=1.0

介电常数：ε=1.0

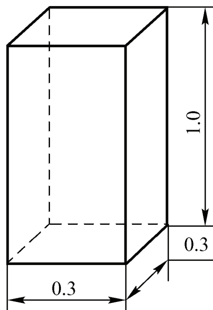


图 4-25 谐振器结构示意图

4.3.2 问题分析

该问题属于模态分析问题。选择 Block Lanczos 方法进行模态分析，频率范围设置为 1MHz～100GHz。

4.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu｜File｜Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在

［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 MODAL ANALYSIS OF A RECTANGULAR CAVITY，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）在 Utility Menu 的命令输入栏中输入“ET, 1, HF120, 2”，单击键盘上的〈Enter〉键确认。

提示：由于 ANSYS 16.1 不再建议使用 HF120 单元，因此无法通过 GUI 操作的方式从单元类型列表中直接选取该单元，但读者可以通过命令输入的方式继续使用该单元（该单元对于解决高频电磁场问题很有帮助）。注意，输入命令时，其中的逗号需采用英文格式。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，显示 HF120 单元已被选取，如图 4-26 所示。单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

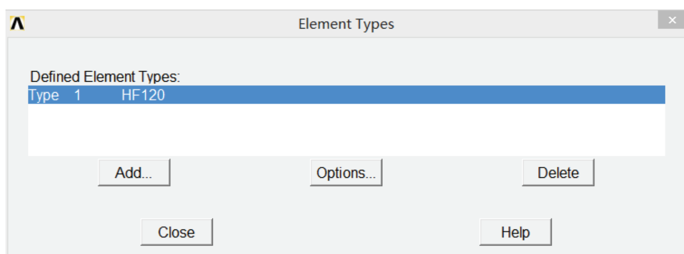


图 4-26　定义单元类型对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中，依次单击 Electromagnetics、Relative Permeability、Constant 选项，出现 Permeability for Material Number 1 对话框，在 MURX 输入栏中输入 1，如图 4-27 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

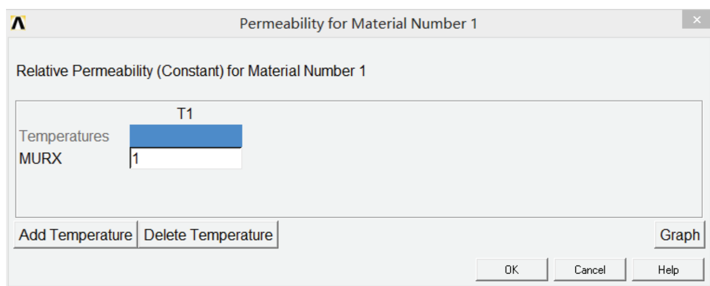


图 4-27　输入相对磁导率对话框

提示：输入相对磁导率。

3）在 Material Models Available 一栏中，依次单击 Electromagnetics、Relative Permittivity、Constant 选项，出现 Relative Permittivity for Material Number 1 对话框，在 PERX 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：输入介电常数。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 H=0.3，单击 Accept 按钮；输入 W=0.3，单击 Accept 按钮；输入 L=1.0，单击 Accept 按钮；输入 FRQSTR=1.0E6，单击 Accept 按钮；输入 FRQEND=100E9，单击 Accept 按钮；输入 MODES=1，单击 Accept 按钮，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | View Direction 命令，出现 View Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 0.75、0.5、0.6，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，参照图 4-28 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

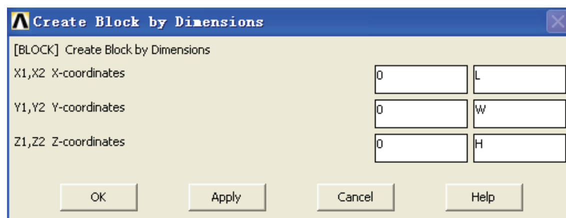


图 4-28　生成长方体对话框

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，如图 4-29a 所示，单击 Apply 按钮，在 Min,Max 输入栏中输入 L，在第 5 栏中选择 Also Select，如图 4-29b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择线段中点 X 坐标值为 0 和 L 的所有线段。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置线段单元等分数。

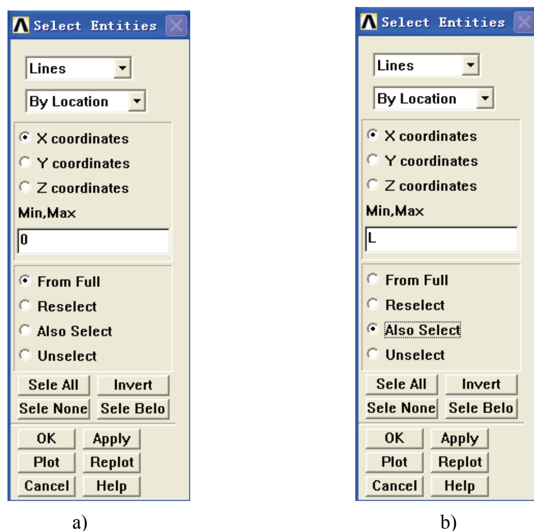


图 4-29　选择实体对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 Invert 按钮，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择线段中点 X 坐标值为 0 和 L 的线段之外的所有线段。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 12，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | 4 to 6 sided 命令，出现 Mesh Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

提示：进行映射网格划分。

9）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 4-30 所示。

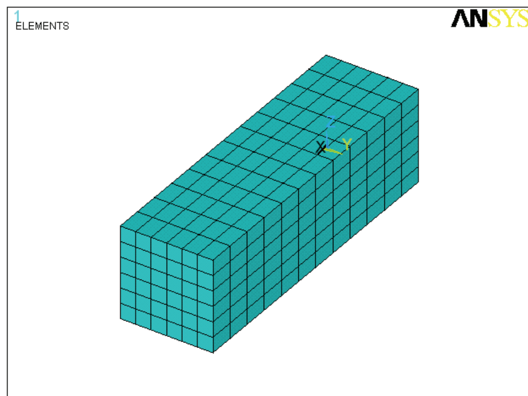


图 4-30　网格划分结果显示

10）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

注意：选择所有实体进行保存，若不执行此项操作，则仅前面所选择的一部分模型信息被保存。

11）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5. 加载求解

1）选择 Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，在［ANTYPE］ Type of analysis 选项中选择 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Analysis Options 命令，出现 Modal Analysis 对话框，参照图 4-31 对其进行设置。

3）单击 OK 按钮，出现 Block Lanczos Method 对话框，在 FREQB Start Freq（initial shift）输入栏中输入 FRQSTR，在 FREQE End Frequency 输入栏中输入 FRQEND，在 Nrmkey Normalize mode shapes 下拉菜单中选择 To unity，如图 4-32 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

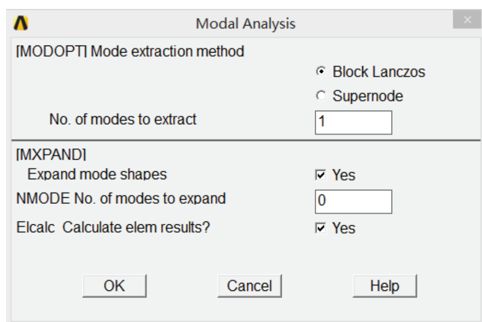


图 4-31 模态分析设置对话框

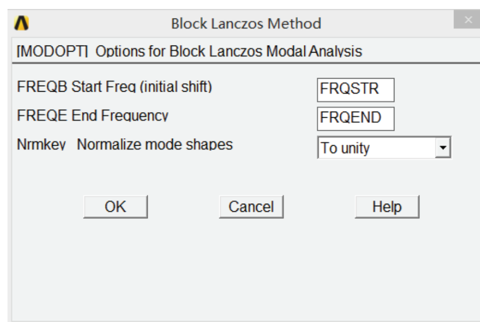


图 4-32 Block Lanczos Method 对话框

4）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Electric｜Boundary｜Electric Wall｜On Areas 命令，出现 Apply Electric W 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

7）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

8）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6. 查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Read Results｜Last Set 命令，读取最后一步的求解结果。

提示：若需读入光盘中的数据文件（.DB 文件），则需执行 Main Menu｜General Postproc｜Data & File Opts 命令读入相应的.rmg 结果文件。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Results Summary 命令，ANSYS 将列表显示计算结果相关信息，如图 4-33 所示。

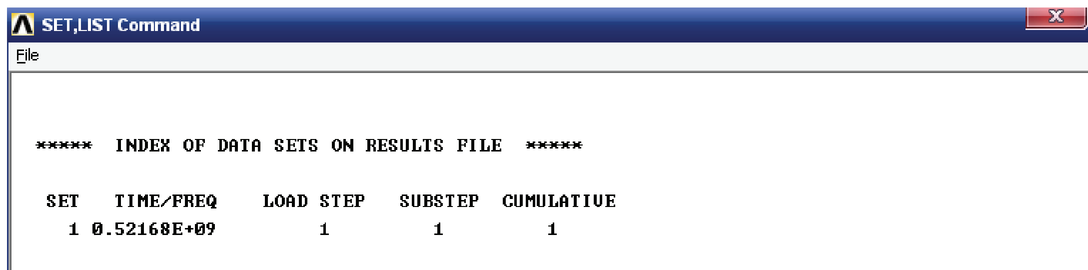


图 4-33 计算结果相关信息显示

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Vector Plot | Predefined 命令，出现 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框，在 Item Vector item to be plotted 列表框中选择 Flux & gradient，Mag field H，在 Loc Vector location for results 选项中选择 Elem Nodes，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示磁场矢量图，如图 4-34 所示。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Vector Plot | Predefined 命令，出现 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框，在 Item Vector item to be plotted 列表框中选择 Flux & gradient，Elec field EF，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示电场矢量图，如图 4-35 所示。

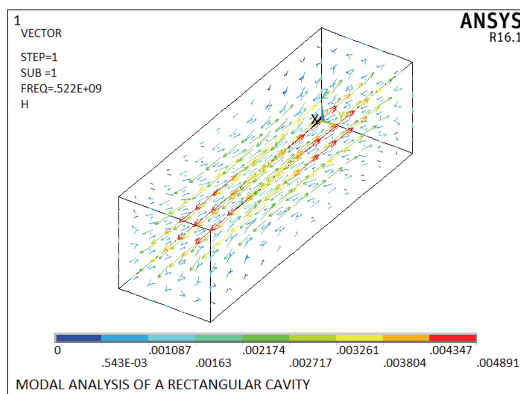


图 4-34 磁场矢量显示

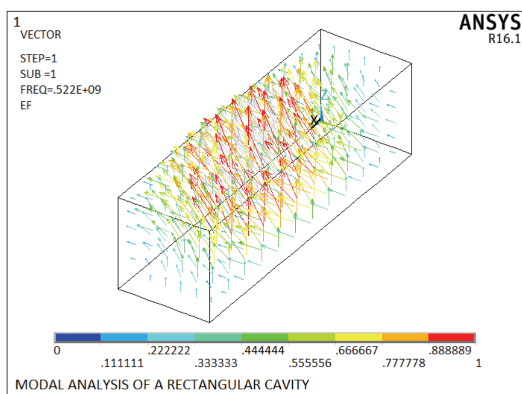


图 4-35 电场矢量显示

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可将谐振器设置为圆柱形，建立几何模型并施加相应的边界条件，再进行求解计算，比较求解结果和上述实例求解结果的差别。

4.3.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE2                        ! 定义工作文件名
```

```
/TITLE，MODAL ANALYSIS OF A RECTANGULAR CAVITY
                                                    ！定义工作标题
/PREP7                                              ！进入前处理器
ET，1，HF120                                        ！定义单元类型
KEYOPT，1，1，2                                     ！定义单元关键字
MP，MURX，1，1.0                                    ！输入相对磁导率
MP，PERX，1，1.0                                    ！输入介电常数
H=0.3                                               ！输入参数
W=0.3
L=1.0
FRQSTR=1.0E6
FRQEND=100E9
MODES=1
/VIEW，，.75，.5，.6                                ！设置视图显示方向
/VUP，1，Z
BLOCK，0，L，0，W，0，H                             ！生成长方体
LSEL，S，LOC，X，0                                  ！选择线段
LSEL，A，LOC，X，L
LESIZE，ALL，，，6                                  ！设置线段等分数
LSEL，INVE                                          ！反向选择线段
LESIZE，ALL，，，12
VMESH，1                                            ！对面进行网格划分
EPLOT                                               ！显示单元
ALLSEL                                              ！选择所有实体
SAVE
FINISH

/SOLU                                               ！进入求解器
ANTYPE，MODAL                                       ！指定分析类型为模态分析
MODOPT，LANB，MODES，FRQSTR，FRQEND，，ON
                                                    ！模态分析选项设置
MXPAND，，，，YES                                   ！扩展模态
DA，ALL，AX，0                                      ！施加磁势能约束
SAVE
SOLVE                                               ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                              ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST                                           ！读取最终求解结果
SET，LIST                                           ！显示求解摘要
PLVECT，H，，，，VECT，NODE，ON                     ！绘制磁场矢量图
PLVECT，EF，，，，VECT，NODE，ON                    ！绘制电场矢量图
FINISH
/EXIT                                               ！退出 ANSYS
```

4.4 谐响应分析实例详解——弹簧质量系统受谐载荷

4.4.1 问题描述

图 4-36 所示为一弹簧质量系统，载荷 F（t）随时间的变化曲线如图 4-37 所示，其频率变化范围为 0.1~1.2Hz，求系统的位移频率响应。系统参量值参见表 4-14。

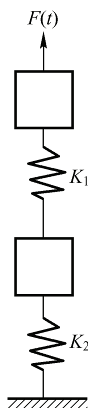


图 4-36 弹簧质量系统受力示意图

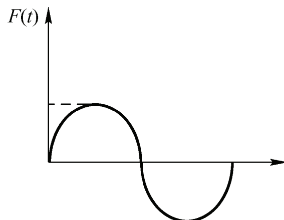


图 4-37 载荷示意图

表 4-14 系统参量值

K_1/（N/m）	K_2/（N/m）	m_1/ kg	m_2/ kg	F_0/ N
15	30	2	3	60

4.4.2 问题分析

该问题属于谐响应分析问题。对弹簧质量系统进行简化处理，建立如图 4-38 所示的有限元模型进行分析求解。

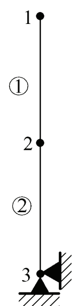


图 4-38 有限元模型

4.4.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu｜File｜Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu｜File｜Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 HARMONIC RESPONSE OF A SPRING-MASS SYSTEM，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Combination，Combination 40，在 Element

type reference number 输入栏中输入 1，如图 4-39 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

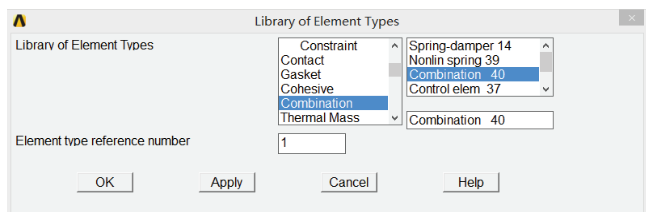


图 4-39　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 COMBIN40 element type options 对话框，在 Element degree（s）of freedom　K3 下拉菜单中选择 UY，其余选项采用默认设置，如图 4-40 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

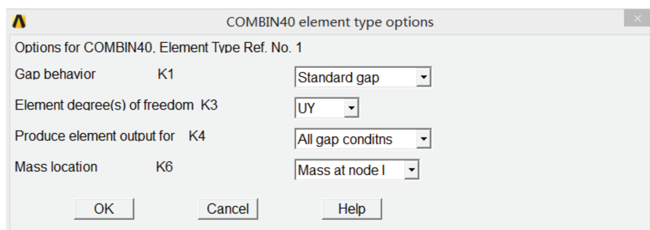
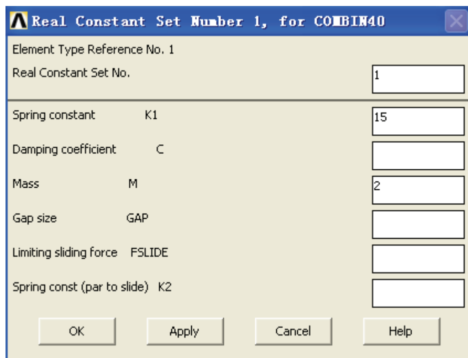


图 4-40　COMBIN40 单元关键字设置对话框

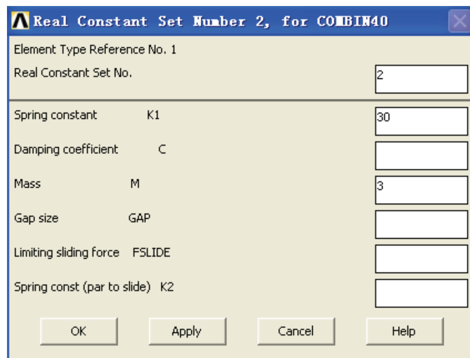
4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for COMBIN40 对话框，参照图 4-41a 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Real Constants 对话框上单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 2，for COMBIN40 对话框，参照图 4-41b 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a)



b)

图 4-41　输入单元实常数对话框

7）单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．创建有限元模型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes In Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0、2、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）参照第 1）步的操作过程，依次在 ANSYS 显示窗口生成以下节点编号及坐标：

2（0，1，0）；　3（0，0，0）

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Elements Attributes 对话框，在［REAL］ Real constant set number 下拉菜单中选择 1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置单元属性。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements From Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过节点创建单元。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Elements Attributes 对话框，在［REAL］ Real constant set number 下拉菜单中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements From Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 4-42 所示。

8）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框。选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Modal Analysis 对话框，参照图 4-43 对其进行设置。单击 OK 按钮，出现 Block Lanczos Method 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout 命令，出现 Solution Printout Controls 对话框，在 FREQ　Print frequency 选项中选择 Every substep，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

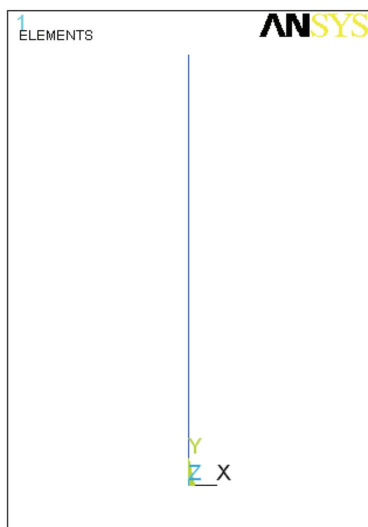


图 4-42　有限元模型结果显示

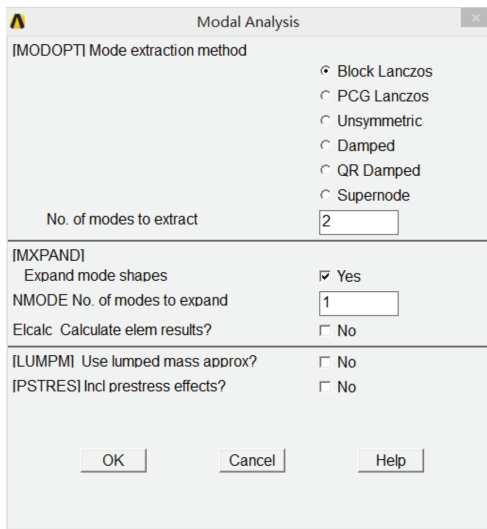


图 4-43　模态分析选项设置对话框

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，如图 4-44 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

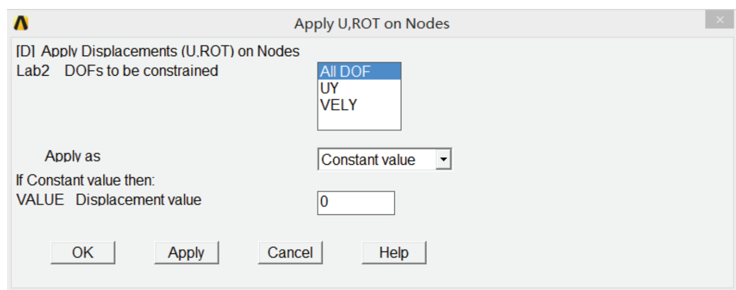


图 4-44　施加位移约束对话框

5）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

提示：若出现 Verify 对话框，可单击其上的 Yes 按钮关闭该对话框继续求解过程。

6）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Finish 命令，结束本次求解过程。

9）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型选为 Harmonic，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Harmonic

Analysis 对话框，在［HROPT］ Solution method 下拉菜单中选择 Mode Superposn，其余选项采用默认设置，如图 4-45 所示。单击 OK 按钮，出现 Mode Sup Harmonic Analysis 对话框，在［HROPT］ Maximum mode number 输入栏中输入 2，其余选项采用默认设置，如图 4-46 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

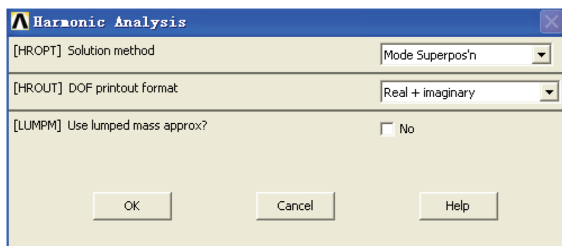


图 4-45　谐响应分析设置对话框

11）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequence | Freq and Substps 命令，出现 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，参照图 4-47 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

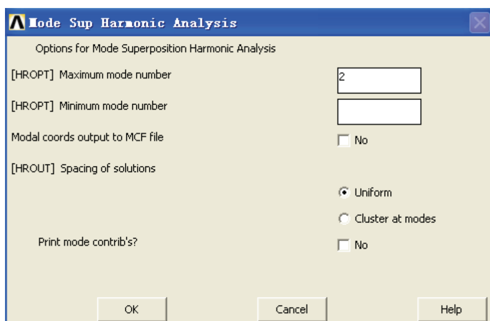


图 4-46　模态叠加设置对话框

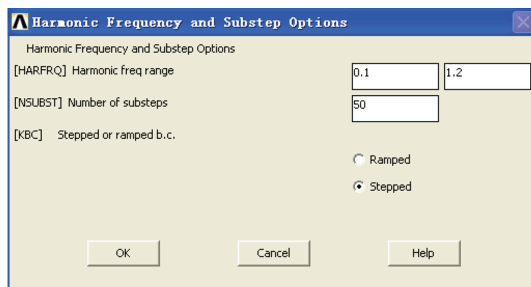


图 4-47　频率与子步长设置对话框

12）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | DB/Results File 命令，出现 Controls for Database and Results File Writing 对话框，参照图 4-48 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，参照图 4-49 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在编号为 1 的节点上施加集中力载荷。

14）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

提示：若出现 Verify 对话框，可单击其上的 Yes 按钮关闭该对话框继续求解过程。

15）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save



Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

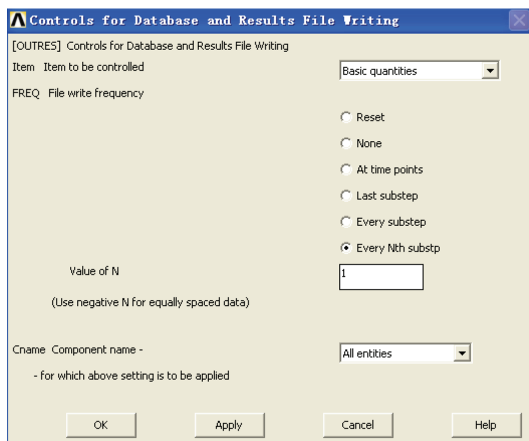


图 4-48　写入结果文件设置对话框

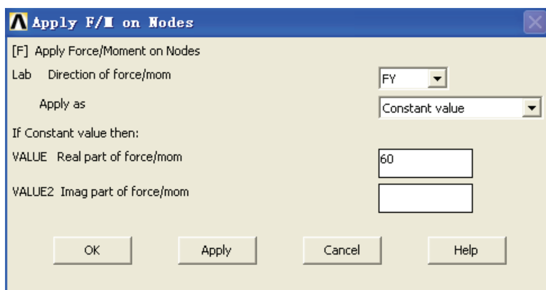


图 4-49　施加集中力载荷对话框

5．查看求解结果

1）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 4-50 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

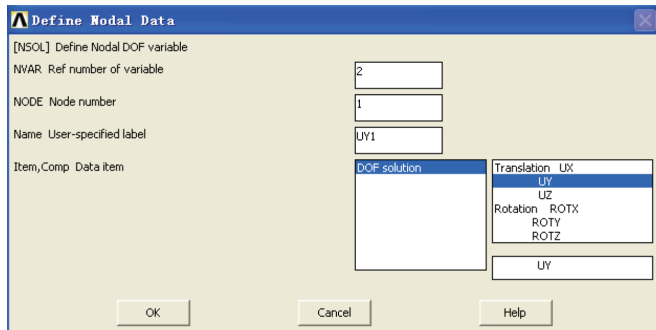


图 4-50　定义节点变量对话框

提示：*在执行上述操作的过程中，会出现 Time History Varibles－．\EXERCISE3.rfrq 对话框，表示系统自动读取结果文件 EXERCISE3.rfrq，可执行其上的 File | Close 命令关闭该对话框。*

2）单击 Defined Time-History Variables 对话框上的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 NVAR Ref number of variable 输入栏中输入 3，在 NODE Node number 输入栏中输入 2，在 Name User-specified label 输入栏中输入 UY2，在 Item, Comp Data item 列表框中选择 DOF

solution，Translation UY，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）单击 Defined Time-History Variables 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，在 NVAR2 2nd variable 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示节点 1、2 的位移频率响应曲线，如图 4-51 所示。

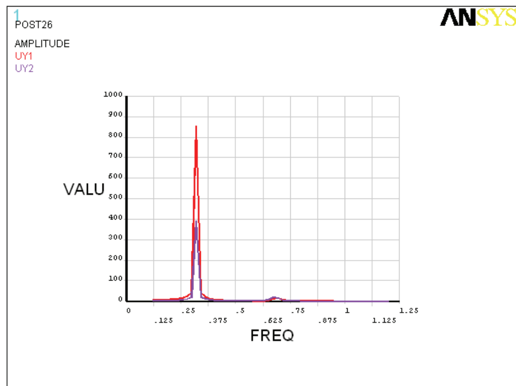


图 4-51 节点位移频率变化关系曲线

5）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：试改变弹簧质量系统的结构，如减少或增加其质量单元，再进行求解计算。

4.4.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE3                              ！定义工作文件名
/TITLE，HARMONIC RESPONSE OF A SPRING-MASS SYSTEM
                                                 ！定义工作标题
/PREP7                                           ！进入前处理器
ET，1，COMBIN40                                  ！选择单元类型
KEYOPT，1，3，2                                  ！设置单元关键字
R，1，15，，2                                    ！定义单元实常数
R，2，30，，3
/PNUM，NODE，1                                   ！显示节点编号
N，1，0，2                                       ！创建节点
N，2，0，1
N，3
REAL，1                                          ！指定实常数参考号
E，1，2                                          ！生成单元
REAL，2
E，2，3
EPLOT                                            ！显示单元
SAVE
FINISH
```

```
/SOLU                                      ! 进入求解器
ANTYPE，2                                  ! 定义求解类型
MODOPT，LANB，2                            ! 设置模态分析选项
EQSLV，SPAR
MXPAND，1,,，0
LUMPM，0
PSTRES，0
OUTPR,，ALL                                ! 设置输出选项
D，3，ALL                                  ! 施加位移约束
SOLVE                                      ! 开始模态分析计算
SAVE
FINISH

/SOLU                                      ! 再次进入求解器
ANTYPE，3                                  ! 定义求解类型
HROPT，MSUP，2                             ! 设置谐响应分析选项
HARFRQ，0.1，1.2                           ! 指定频率范围
KBC，1                                     ! 设置加载方式
NSUBST，50                                 ! 指定分析子步数
OUTRES,，1
F，1，FY，60                               ! 施加集中力载荷
SOLVE                                      ! 开始谐响应分析计算
SAVE
FINISH

/POST26                                    ! 进入 POST26 后处理器
FILE，EXERCISE3，RFRQ                      ! 读取结果文件
NSOL，2，1，U，Y，UY1                      ! 定义时间历程变量
NSOL，3，2，U，Y，UY2
PLVAR，2，3                                ! 曲线显示变量
FINISH
/EXIT，ALL                                 ! 退出 ANSYS
```

4.5 谐响应分析实例详解——有预应力的吉他弦谐响应分析

4.5.1 问题描述

一根长度为 1m、直径为 0.36mm 的形状均匀的吉他弦，在施加拉伸载荷 F_1=120N 后被紧绷在两个刚性支点间，在弦的 1/4 长度处以力 F_2=2N 弹击此弦，如图 4-52 所示。试对此吉他弦进行谐响应分析。

吉他弦材料的弹性模量为 220GPa，密度为 7800kg/m^3。

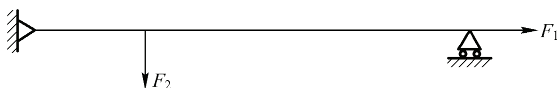


图 4-52　吉他弦受力示意图

4.5.2 问题分析

该问题属于有预应力的谐响应分析问题。在分析过程中，取弹击力的频率范围为 0～2000Hz，选择频率间隔为 250Hz，以观察吉他弦在前几个固有频率处的响应。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 LINK1 杆单元。

4.5.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu｜File｜Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu｜File｜Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 HARMONIC RESPONSE OF A GUITAR STRING，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link，3D finit stn 180，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 4-53 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

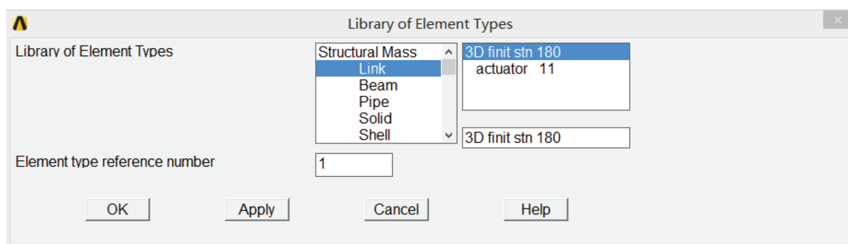


图 4-53 单元类型列表对话框

2）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Real Constants｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for LINK180 对话框，在 Cross-sectional area AREA 输入栏中输入 1.017E-7，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

提示：该实常数表示吉他弦的横截面积，单位为 m^2。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Material Props｜Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、

Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Propeties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E11，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Density 选项，出现 Density for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 7.8E3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes In Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，单击 Apply 按钮，在 NODE Node number 输入栏中输入 41，在 X,Y,Z Location in active CS 的 3 个输入栏中分别输入 1、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 1，41，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，参考图 4-54 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在节点 1、41 之间生成 39 个节点。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：通过节点生成单元。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，参照图 4-55 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

Create Nodes Between 2 Nodes

[FILL] Create Nodes Between 2 Nodes		
NODE1,NODE2 Fill between nodes	1	41
NFILL Number of nodes to fill	39	
NSTRT Starting node no.		
NINC Inc. between filled nodes		
SPACE Spacing ratio	1	
ITIME No. of fill operations - (including original)	1	
INC Node number increment - (for each successive fill operation)	1	

OK Apply Cancel Help

图 4-54　在两节点间生成节点对话框

Copy Elements (Automatically-Numbered)

[EGEN] Copy Elements (Automatically Numbered)	
ITIME Total number of copies - including original	40
NINC Node number increment	1
MINC Material no. increment	
TINC Elem type no. increment	
RINC Real constant no. incr	
SINC Section ID no. incr	
CINC Elem coord sys no. incr	
DX (opt) X-offset in active	
DY (opt) Y-offset in active	
DZ (opt) Z-offset in active	

OK Apply Cancel Help

图 4-55　单元复制选项设置对话框

5）选择 Utility Menu | Plot | Element 命令，ANSYS 显示窗口显示生成的有限元模型，如图 4-56 所示。

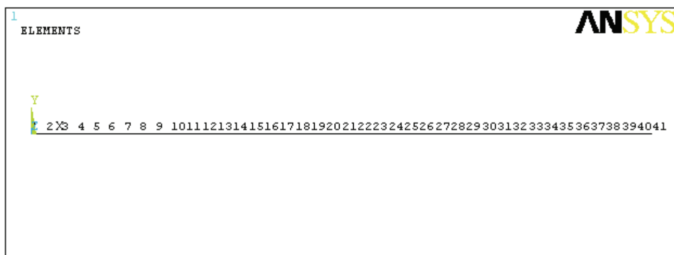


图 4-56 有限元模型

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 1 施加位移约束。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在第 4 栏中选择 Min,Max,Inc，在输入栏中输入 2，41，1，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 2 ~ 节点 41 的 40 个节点施加 Y 方向的位移约束。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Loads | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 41，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉选框中选择 FX，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入 120，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 41 施加 X 方向的预应力。

9）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-1.db，保存操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：进行稳态求解，求解预应力作用下的吉他弦响应。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sols Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 4-57 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

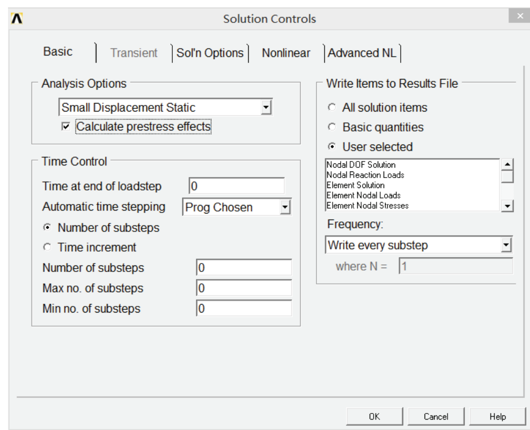


图 4-57　求解控制基本选项设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Finish 命令。

注意：执行上述的操作表示上一阶段的求解过程结束。

5）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：进行模态分析。

6）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Modal Analysis 对话框，参照图 4-58 所示对其进行设置，单击 OK 按钮，出现 Block Lanczos Method 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

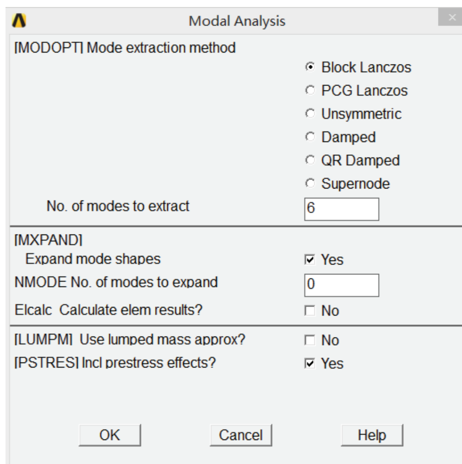


图 4-58　模态分析属性设置对话框

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Delete | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在第 4 栏中选择 Min,Max,Inc，在输入

栏中输入 2，40，1，单击 OK 按钮，出现 Delete Node Constraints 对话框，在 Lab　DOFs to be deleted 下拉选框中选择 UY，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Finish 命令。

10）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Harmonic，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Harmonic Analysis 对话框，在［HROPT］ Solution method 下拉选框中选择 Mode Superpos'n，在［HROUT］ DOF printout format 下拉选框中选择 Amplitud+phase，单击 OK 按钮，出现 Mode Sup Harmonic Analysis 对话框，在［HROPT］ Maxium mode number 输入栏中输入 6，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Freq and Substps 命令，出现 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，参照图 4-59 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Delete | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 41，单击 OK 按钮，出现 Delete F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Force/moment to be deleted 下拉选框中选择 FX，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Direction of force/mom 下拉选框中选择 FY，在 VALUE Real part of force/mom 输入栏中输入-2，如图 4-60 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

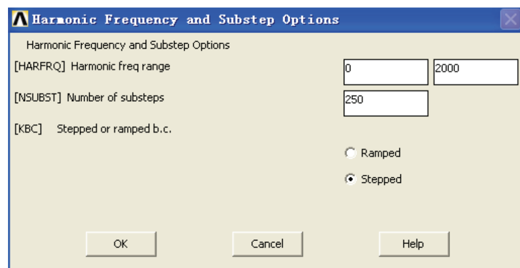


图 4-59　频率和子步数设置对话框

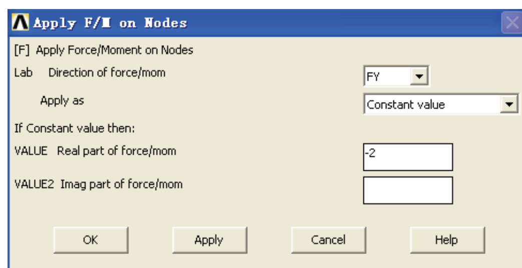


图 4-60　施加集中力载荷对话框

提示：对编号为 11 的节点施加 Y 方向上的集中力-2。

15）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Finish 命令。

17）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 21，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 4-61 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

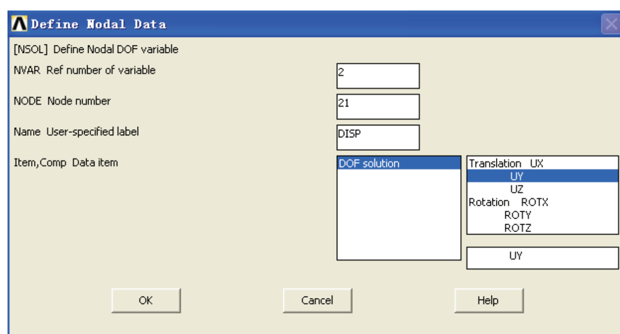


图 4-61　定义节点数据对话框

注意：在执行上述操作的过程中，会出现 Time History Variables –．\EXERCISE4.rfrq 对话框，表示系统自动读取结果文件 EXERCISE4.rfrq，可执行其上的 File | Close 命令关闭该对话框。

2）单击 Defined Time-History Variables 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示长杆的位移时间响应曲线，如图 4-62 所示。

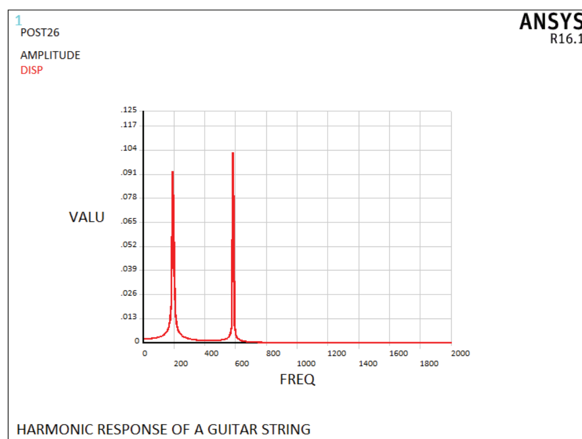


图 4-62　吉他弦的谐响应曲线

4）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：试对没有预应力的吉他弦进行谐响应分析。

4.5.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE4                                  ! 定义工作文件名
/TITLE， HARMONIC RESPONSE OF A GUITAR STRING        ! 定义工作标题

/PREP7                                               ! 进入前处理器
ET，1，LINK180                                       ! 定义单元类型
R，1，1.017E-7                                       ! 定义实常数
MP，EX，1，2.2E11                                    ! 定义材料参数
MP，DENS，1，7.8E3
N，1                                                 ! 创建节点
N，41，1
FILL
E，1，2                                              ! 创建单元
EGEN，40，1，1
D，1，ALL                                            ! 施加位移约束
D，2，UY,,，41
F，41，FX，120                                       ! 施加集中力载荷
SAVE
FINISH

/SOLU                                                ! 进入求解器
ANTYPE，STATIC                                       ! 指定求解类型
PSTRES，ON                                           ! 开启预应力选项
OUTPR，BASIC，1
SOLVE                                                ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE，MODAL                                        ! 进行模态分析
MODOPT，LANB，6
PSTRES，ON
DDEL，2，UY，40
SOLVE
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE，HARMIC                                       ! 进行谐响应分析
HROPT，MSUP，6
HROUT，OFF
KBC，1
HARFRQ,，2000
```

```
NSUBST，250
FDELE，41，FX
F，11，FY，-2
SOLVE
SAVE
FINISH

/POST26                                    ! 进入 POST26 后处理器
FILE，EXERCISE4，RFRQ                      ! 读取结果文件
NSOL，2，21，U，Y，DISP                    ! 定义节点变量
PLVAR，2                                   ! 绘制吉他弦的谐响应曲线
FINISH
/EXIT，ALL                                 ! 退出 ANSYS
```

4.6 瞬态动力学分析实例详解——钟摆摆动分析

4.6.1 问题描述

图 4-63 所示为一钟摆装置，初始位置位于θ_0处，求钟摆的位移时间变化关系。

几何参数如下。

摆杆长度：L=5m；摆杆横截面面积：$S=6\times10^{-5}m^2$

初始位置：θ_0=53.135°

摆锤质量：m=2kg；弹性模量：E=200GPa

载荷：$g=9.8m/s^2$

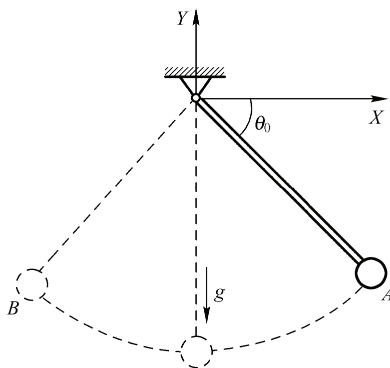


图 4-63　钟摆结构示意图

4.6.2 问题分析

该问题属于瞬态动力学分析问题。设置初始加载时间为 0.01s，将重力加速度施加于摆锤之上；之后分为 4 个时间段分析摆锤从 A 运动到 B 的过程。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS12.0 的 LINK8 杆单元。

4.6.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在[/FILNAM] Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 LARGE ROTATION OF A SWINGING PENDULUM，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link，3D finit stn 180，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Mass，3D mass 21，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Element Types 对话框中选择 Type 2 MASS21，单击 Options 按钮，出现 MASS21 element type options 对话框，在 Rotary inertia options K3 下拉菜单中选择 3-D w/o rot iner，其余选项采用默认设置，如图 4-64 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 1 LINK180，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for LINK180 对话框，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 1，在 Cross-sectional area AREA 输入栏中输入 6E-5，如图 4-65 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

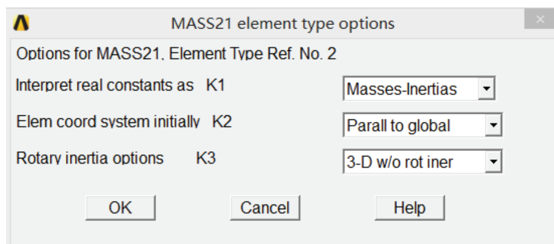


图 4-64 MASS21 单元关键字设置对话框

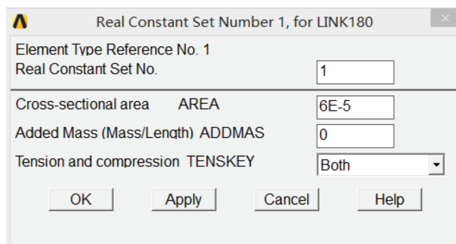


图 4-65 LINK180 单元实常数设置对话框

6）在 Real Constants 对话框上单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 2 MASS21，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 2，for MASS21 对话框，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 2，在 3-D mass MASS 输入栏中输入 2，如图 4-66 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define

Material Model Behavior 对话框。

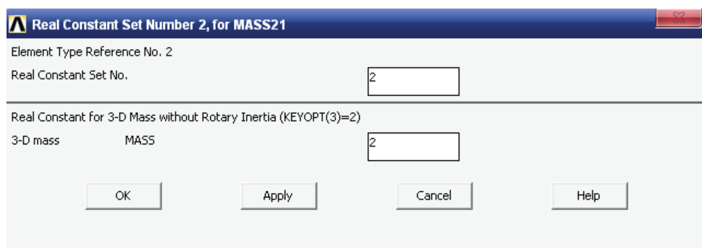


图 4-66　MASS21 单元实常数设置对话框

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Propeties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.0E11，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建有限元模型

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示： 将 ANSYS 显示窗口的颜色从默认的黑色设置为白色。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes In Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，单击 Apply 按钮，在 NODE　Node number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 3、-4、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements From Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示： 通过节点生成单元。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉菜单中选择 2 MASS21，在［REAL］ Real constant set number 下拉菜单中选择 2，如图 4-67 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements From Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

6）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 4-68 所示。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

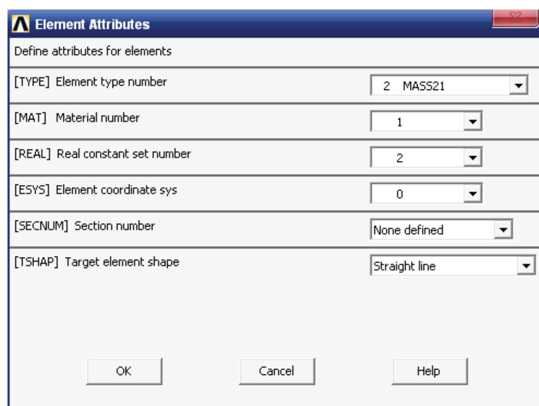


图 4-67 单元属性设置对话框

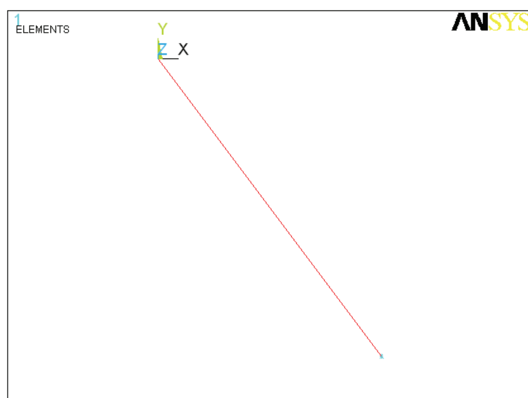


图 4-68 有限元模型结果显示

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UZ，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 1、2 施加 Z 方向的位移约束。

2）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 4-69 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 1 施加 X、Y 方向的位移约束。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Inertia | Gravity | Global 命令，出现 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框，在 ACELY Global Cartesian Y-comp 输入栏中输入 9.8，在其余两个输入栏中输入 0，如图 4-70 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

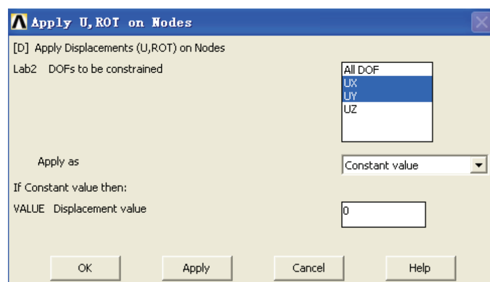


图 4-69 施加位移约束对话框

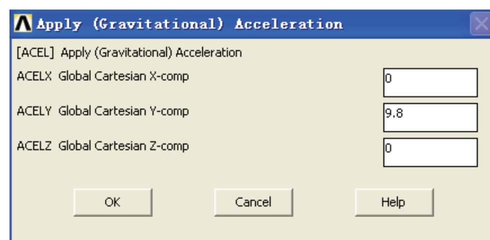


图 4-70 施加重力加速度对话框

4）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框。选择分析类型为 Transient，单击 OK 按钮，出现 Transient Analysis 对话框，在［TRNOPT］ Solution method 选项中选择 Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 4-71 对其进行设置，单击 Transient 选项卡，参照图 4-72 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

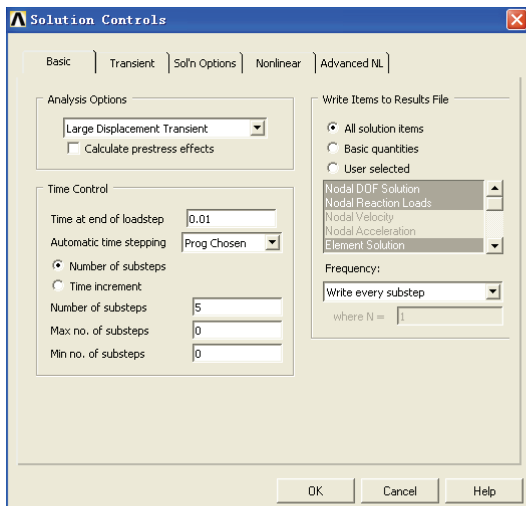


图 4-71　求解控制基本选项设置对话框

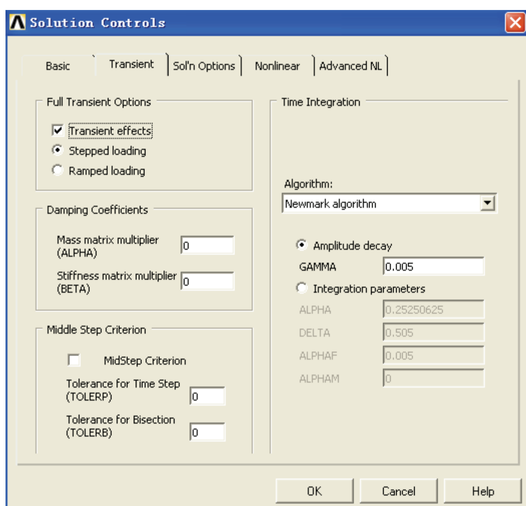


图 4-72　求解控制瞬态选项设置对话框

6）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将求解信息写入到载荷步文件 1。

7）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，在 Time at end of loadstep 输入栏中输入 1.17975，在 Number of substeps 输入栏中输入 8，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，在 Time at end of loadstep 输入栏中输入 2.3595，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution

Controls 对话框，单击 Basic 按钮，在 Time at end of loadstep 输入栏中输入 3.53925，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 按钮，在 Time at end of loadstep 输入栏中输入 4.719，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Solution | Solve | From LS Files 命令，出现 Solve Load Step Files 对话框，在 LSMIN　Starting LS file number 输入栏中输入 1，在 LSMAX　Ending LS file number 输入栏中输入 5，在 LSINC　File number increment 输入栏中输入 1，如图 4-73 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

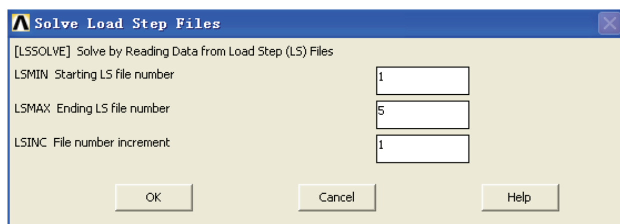


图 4-73　按载荷步文件求解设置对话框

16）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

17）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6. 查看求解结果

1）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 4-74 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将编号为 2 的节点的 X 方向的位移定义为变量 2。

提示：若读入光盘中的数据文件（.DB 文件），需执行 Main Menu | TimeHist Postpro 命令，出现 Time History Variables 对话框，选择 File | Open Results 命令，出现 Select Results File 对话框，然后选择读入相应的 EXERCISE5.rst 结果文件。

2）单击 Defined Time-History Variables 对话框上的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜

单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 NVAR Ref number of variable 输入栏中输入 3，在 NODE Node number 输入栏中输入 2，在 Name User-specified label 输入栏中输入 UY2，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UY，单击 OK 按钮关闭该对话框。

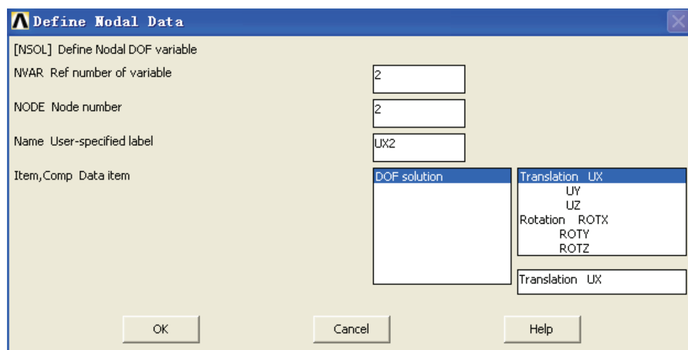


图 4-74 定义节点数据对话框

提示：将编号为 2 的节点的 Y 方向的位移定义为变量 3。

3）单击 Defined Time-History Variables 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，在 NVAR2 2st variable to graph 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示摆锤的位移时间响应曲线，如图 4-75 所示。

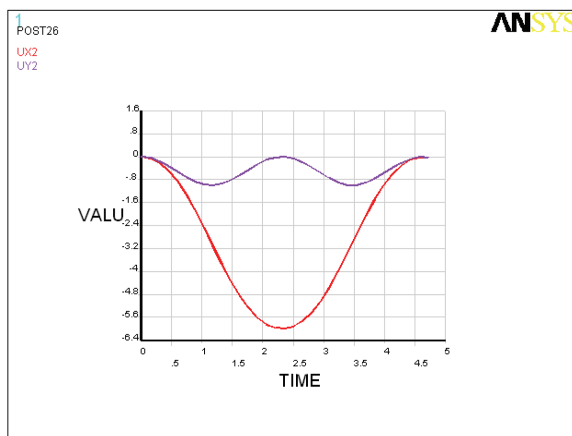
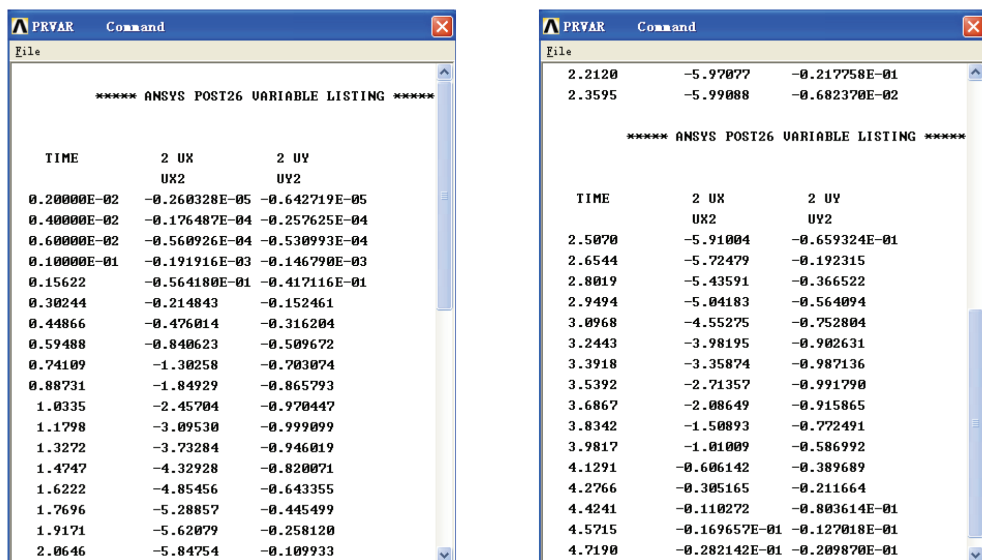


图 4-75 摆锤的位移时间变化关系曲线

5）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | List Variables 命令，出现 List Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to list 输入栏中输入 2，在 NVAR2 2st variable to list 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 程序将列表显示摆锤的时间位移响应，如图 4-76 所示。



PRVAR Command

File

```
       ***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

 TIME          2 UX          2 UY
               UX2           UY2
0.20000E-02   -0.260328E-05 -0.642719E-05
0.40000E-02   -0.176487E-04 -0.257625E-04
0.60000E-02   -0.560926E-04 -0.530993E-04
0.10000E-01   -0.191916E-03 -0.146790E-03
0.15622       -0.564180E-01 -0.417116E-01
0.30244       -0.214843     -0.152461
0.44866       -0.476014     -0.316204
0.59488       -0.840623     -0.509672
0.74109        -1.30258     -0.703074
0.88731        -1.84929     -0.865793
 1.0335        -2.45704     -0.970447
 1.1798        -3.09530     -0.999099
 1.3272        -3.73284     -0.946019
 1.4747        -4.32928     -0.820071
 1.6222        -4.85456     -0.643355
 1.7696        -5.28857     -0.445499
 1.9171        -5.62079     -0.258120
 2.0646        -5.84754     -0.109933
```

PRVAR Command

File

```
 2.2120        -5.97077     -0.217758E-01
 2.3595        -5.99088     -0.682370E-02

       ***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

 TIME          2 UX          2 UY
               UX2           UY2
 2.5070        -5.91004     -0.659324E-01
 2.6544        -5.72479     -0.192315
 2.8019        -5.43591     -0.366522
 2.9494        -5.04183     -0.564094
 3.0968        -4.55275     -0.752804
 3.2443        -3.98195     -0.902631
 3.3918        -3.35874     -0.987136
 3.5392        -2.71357     -0.991790
 3.6867        -2.08649     -0.915865
 3.8342        -1.50893     -0.772491
 3.9817        -1.01009     -0.586992
 4.1291       -0.606142     -0.389689
 4.2766       -0.305165     -0.211664
 4.4241       -0.110272     -0.803614E-01
 4.5715       -0.169657E-01 -0.127018E-01
 4.7190       -0.282142E-01 -0.209870E-01
```

图 4-76　列表显示摆锤时间位移响应

6）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：本例在求解之前已通过分析得到钟摆运动一个周期的时间，并把此周期分为几个时间段进行求解，若事先无法判断钟摆的运动周期，该如何求解？读者可自行试之。

4.6.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE5                              ！定义工作文件名
/TITLE，LARGE ROTATION OF A SWINGING PENDULUM
                                                 ！定义工作标题
/PREP7                                           ！进入前处理器
ET，1，LINK180                                   ！定义单元类型
ET，2，MASS21
KEYOPT，2，3，2                                  ！设置单元关键字
R，1，6E-5                                       ！定义单元实常数
R，2，2
MP，EX，1，2E11                                  ！输入泊松比

N，1                                             ！生成节点
N，2，3，-4
E，1，2                                          ！由节点生成单元
TYPE，2                                          ！指定单元类型参考号
REAL，2                                          ！指定实常数参考号
E，2
EPLOT                                            ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                            ！进入求解器
```

```
D，1，UZ，，，2                              ! 施加位移约束
D，1，UX，，，，，UY
ACEL，，9.8                                  ! 定义重力加速度
ANTYPE，TRANS                                ! 指定分析类型为瞬态分析
NLGEOM，ON                                   ! 打开大变形选项
KBC，1                                       ! 设置加载方式
TIME，0.01                                   ! 指定计算终止时间
NSUBST，5                                    ! 指定计算子步数
OUTRES，，1                                  ! 存储求解结果选项设置
LSWRITE，1                                   ! 写入到载荷步文件 1
TIME，1.17975
NSUBST，8
OUTRES，，1
LSWRITE，2                                   ! 写入到载荷步文件 2
TIME，2.3595
LSWRITE，3                                   ! 写入到载荷步文件 3
TIME，3.53925
LSWRITE，4                                   ! 写入到载荷步文件 4
TIME，4.719
LSWRITE，5                                   ! 写入到载荷步文件 5
LSSOLVE，1，5，1                             ! 按载荷步文件进行求解
SAVE
FINISH

/POST26                                      ! 进入 POST26 后处理器
NSOL，2，2，U，X，UX2                        ! 定义节点变量
NSOL，3，2，U，Y，UY2
PLVAR，2，3                                  ! 绘制变量曲线图
PRVAR，2，3                                  ! 列表显示变量
FINISH
/EXIT，ALL                                   ! 退出 ANSYS
```

4.7 瞬态动力学分析实例详解——滑动摩擦生热分析

4.7.1 问题描述

如图 4-77 所示，A 滑块在 B 固定滑块上运动，试求 A 滑块以 1m/s 的速度向前滑动 15mm 时由于摩擦而引起的温升和应力。（图中所示尺寸为 mm，滑块长度远大于其宽度和高度）

材料参数如下。

弹性模量：E=69GPa；泊松比：ν=0.3；

密度：ρ=2700kg/m^3；

导热系数：K_{xx}=150 W/(m·K)；

线膨胀系数：α=23.9×10^{-6}K^{-1}；

比热：C=900J/(kg · K)；

摩擦系数：μ=0.2

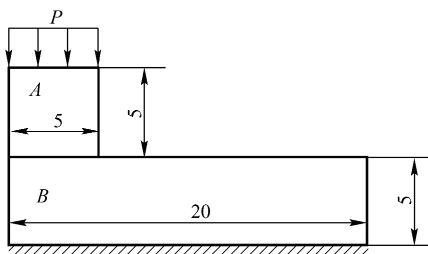


图 4-77　滑块滑动摩擦生热

载荷如下。

P=40MPa

4.7.2 问题分析

该问题属于瞬态动力学中的摩擦生热问题。选择 PLANE13 热结构耦合单元模拟滑块，选择 CONTA171 接触单元和 TARGE169 目标单元生成接触对。分两步对问题进行求解，第一步计算滑块运动过程中的摩擦生热；第二步计算由于热传导而引起的滑块温升。

由于滑块长度远大于其宽度和高度，可以忽略其长度方向上的端面效应，将问题简化为平面应变问题进行求解。

提示：本例中，长度和位移单位采用 mm，力的单位采用 N，时间单位采用 s，温度单位采用 K，则输入材料参数和载荷如下。

弹性模量：E=69000MPa；泊松比：ν=0.3；密度：$\rho=2.7\times10^{-9}\ \mathrm{N\cdot s^2/mm^4}$；

导热系数：$K_{xx}=150\mathrm{N/(s\cdot K)}$；热膨胀系数：$\alpha=23.9\times10^{-6}\ \mathrm{K^{-1}}$；

比热：$C=9\times10^{8}\ \mathrm{mm^2/(s^2\cdot K)}$；摩擦系数：μ=0.2；载荷：P=40MPa

结果输出温度单位为 K，应力单位为 MPa。

4.7.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 FRICTION HEATING OF A SLIDING BLOCK，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Coupled Filed，Vector Quad 13，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 4-78 所示，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Contact，2D target 169，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Contact，2 nd surf 171，在 Element type reference number 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

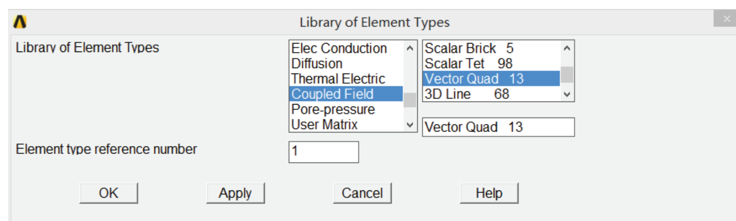


图 4-78　单元类型列表对话框

3）在 Element Types 对话框中选择 Type 1 PLANE13，单击 Options 按钮，出现 PLANE13 element type options 对话框，在 Element degrees of freedom K1 下拉菜单中选择 UX UY TEMP AZ，在 Element behavior K3 下拉菜单中选择 Plane strain，其余选项采用默认设置，如图 4-79 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

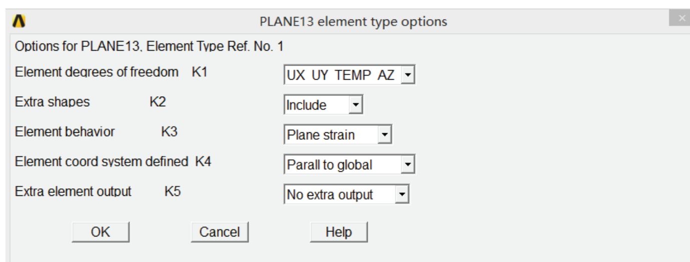


图 4-79 PLANE13 单元关键字设置对话框

4）在 Element Types 对话框中选择 Type 3 CONTA171，单击 Options 按钮，出现 CONTA171 element type options 对话框，在 Elem degree(s) of freedom K1 下拉菜单中选择 UX/UY/TEMP，其余选项采用默认设置，如图 4-80 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

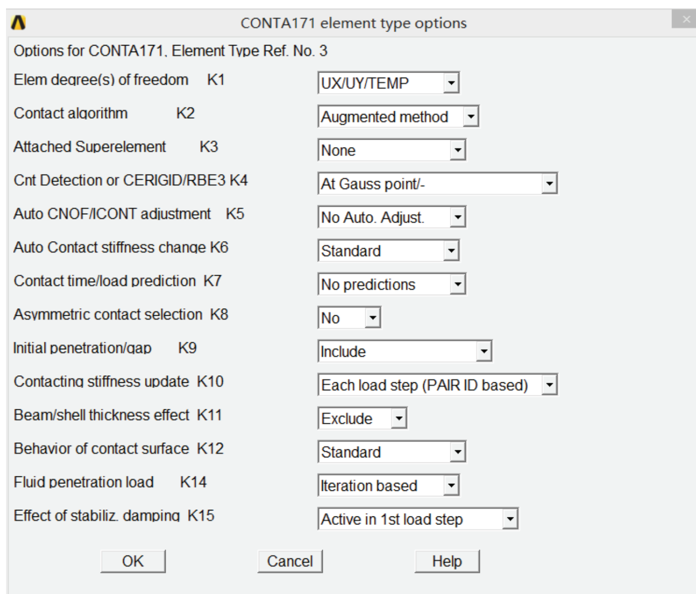


图 4-80 CONTA171 单元关键字设置对话框

5）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 2 TARGE169，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for TARGE169 对话框，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 1，在 R1 和 R2 输入栏中分别输入 0、0，如图 4-81 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

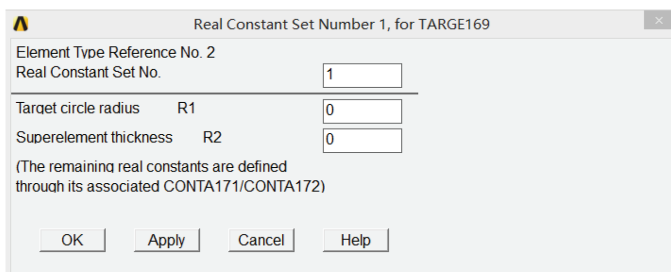


图 4-81　TARGE169 单元实常数设置对话框

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Propeties for Material Number 1 对话框，然后在 EX 输入栏中输入 69000，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Density 选项，出现 Density for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 2.7E-9，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Friction Coefficient 选项，出现 Friction Coefficient for Material Number 1 对话框，在 MU 输入栏中输入 0.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Isotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 2.39E-5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Thermal、Conductivity、Isotropic 选项，出现 Conductivity for Material Number 1 对话框，在 KXX 输入栏中输入 150，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Thermal、Specific Heat 选项，出现 Specific Heat for Material Number 1 对话框，在 C 输入栏中输入 9E8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建有限元模型

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、20，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、5，如图 4-82 所示，

单击 Apply 按钮，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、5，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 5、10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 Size Element edge length 输入栏中输入 1，如图 4-83 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

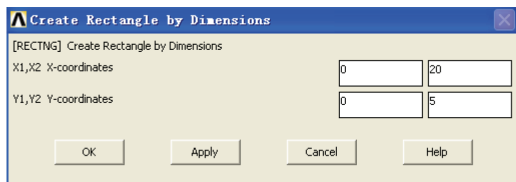


图 4-82 创建矩形面对话框

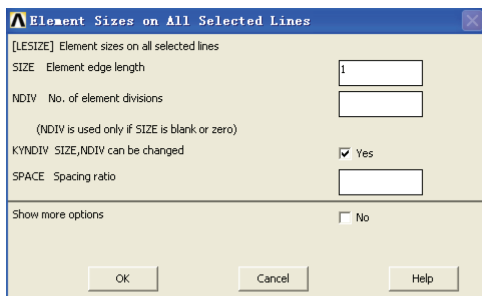


图 4-83 单元尺寸设置对话框

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 对话框，单击 Pick All 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择编号为 3 的线段。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，如图 4-84 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择选定线段上的所有节点。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉菜单中选择 2 TARGE169，在［REAL］ Real constant set number 下拉菜单中选择 1，其余选项采用默认设置，如图 4-85 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf / Contact | Surf to Surf 命令，出现 Mesh Free Surfaces 对话框，在 Tlab Surface element form 下拉菜单中选择 Top surface，在 Shape Base shape of TARGE170s 下拉菜单中选择 Same as target，单击 OK 按钮，出现 Mesh Free Surfaces 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

10）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该菜单。



图 4-84　选择实体对话框

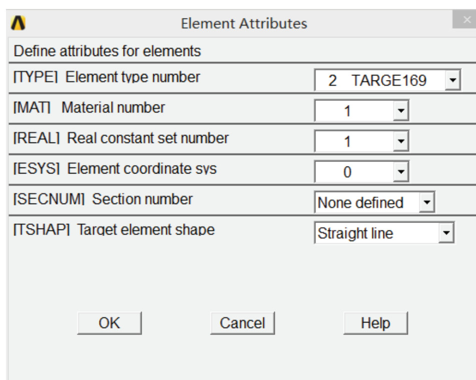


图 4-85　单元属性设置对话框

提示：选择编号为 5 的线段。

12）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择选定线段上的所有节点。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉菜单中选择 3 CONTA171，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf / Contact | Surf to Surf 命令，出现 Mesh Free Surfaces 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮，出现 Mesh Free Surfaces 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

15）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

16）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 4-86 所示。

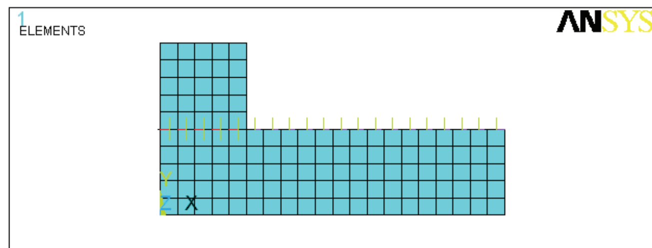


图 4-86　生成的有限元模型结果显示

17）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框。选择分析类型为 Transient，单击 OK 按钮，出现 Transient Analysis 对话框，在［TRNOPT］ Solution method 选项中选择 Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Full Transient Analysis 对话框，参照图 4-87 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

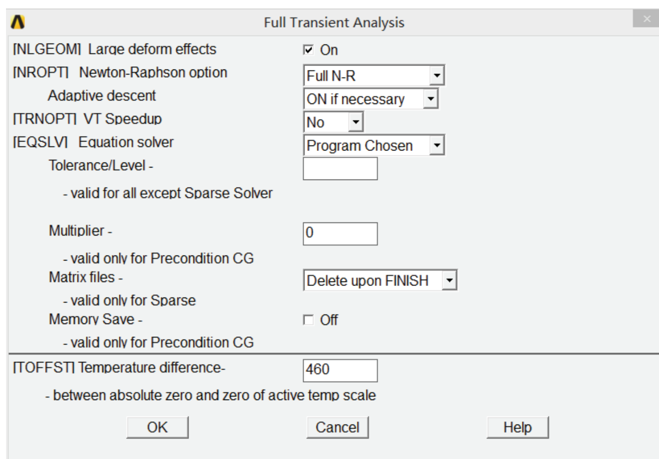


图 4-87　瞬态分析选项设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：施加均匀温度载荷。

4）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Time/Frequenc | Time Integration | Amplitude Decay 命令，出现 Time Integration Controls 对话框，参照图 4-88 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 4-89 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 7，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择编号为 7 的线段。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

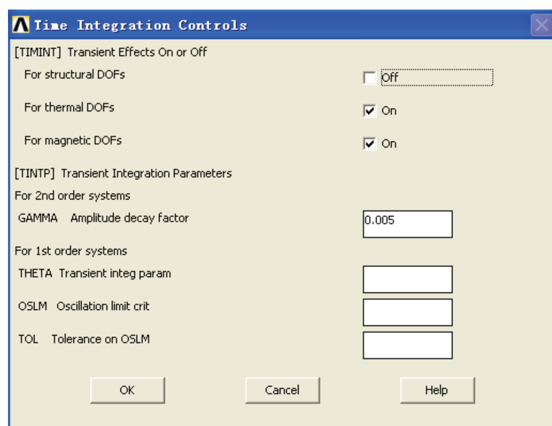


图 4-88 时间积分控制对话框

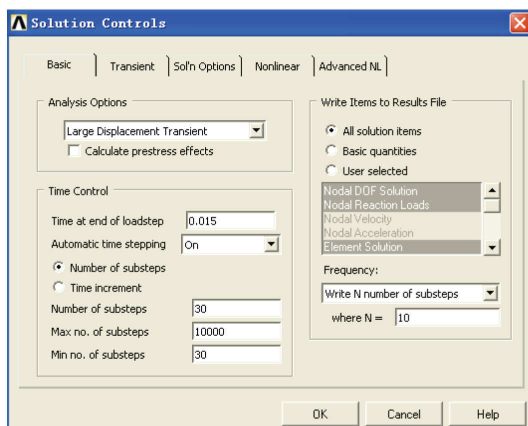


图 4-89 求解控制对话框

提示：选择选定线段上的所有节点。

8）选择 Utility Menu | Parameters | Array Parameters | Define/Edit 命令，出现 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add New Array Parameter 对话框，在 Par Parameter name 输入栏中输入 PRESS，在 Type Parameter type 选项栏中选择 Table，在 Var1 Row Variable 输入栏中输入 TIME，其余选项采用默认设置，如图 4-90 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭 Add New Array Parameter 对话框。

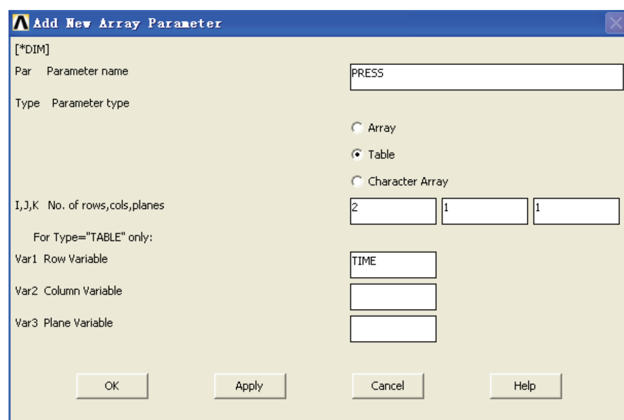


图 4-90 添加数组参数对话框

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在［SF］ Apply PRES on nodes as a 下拉菜单中选择 Existing table，单击 OK 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | Parameters | Array Parameters | Define/Edit 命令，出现 Array Parameters 对话框，单击 Edit 按钮，出现 Table Array：PRESS=f（TIME）对话框，参照图 4-91 对其进行设置，单击 File | Apply/Quit 按钮关闭该对话框，单击 Close 按钮关闭

Array Parameters 对话框。

11）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

12）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择编号为 6 的线段。

13）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择选定线段上的所有节点。

14）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 15，如图 4-92 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

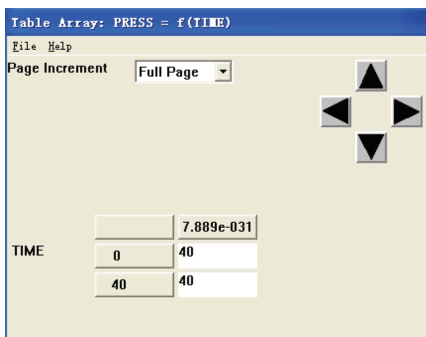


图 4-91　输入数组参数对话框

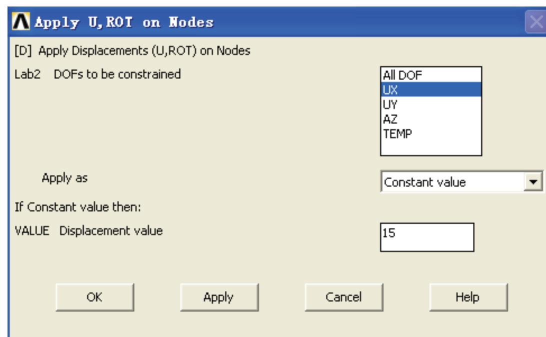


图 4-92　施加位移载荷对话框

15）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

16）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Areas，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择编号为 1 的面。

17）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Areas，all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择选定面上的所有节点。

18）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY，在 VALUE

Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对选定的节点施加 X、Y 方向上的位移约束。

19）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

20）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

21）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

22）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Nodal Temperature，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-93 所示的滑块运动结束时的温度场等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-94 所示的滑块内部 X 方向应力场等值线图。

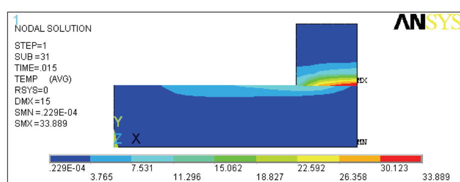


图 4-93 滑块运动结束时其内部温度场等值线图

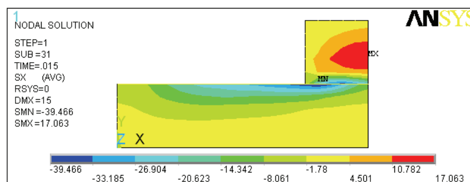


图 4-94 滑块内部 X 方向应力场等值线图

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-95 所示的滑块内部 Y 方向应力场等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Z-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-96 所示的滑块内部 Z 方向应力场等值线图。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-97 所示的滑块内部等效应力场等值线图。

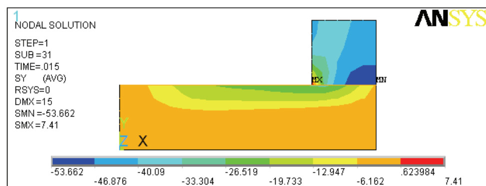


图 4-95 滑块内部 Y 方向应力场等值线图

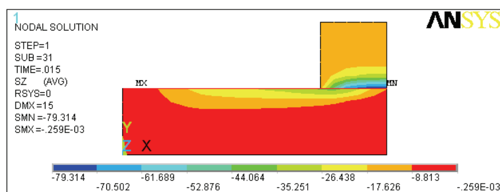


图 4-96 滑块内部 Z 方向应力场等值线图

6）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜Total Strain｜von Mises total strain，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-98 所示的滑块内部等效应变场等值线图。

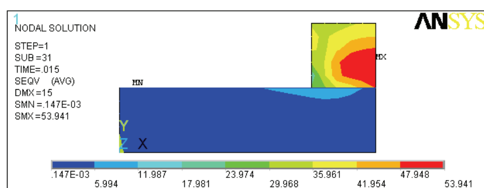


图 4-97 滑块内部等效应力场等值线图

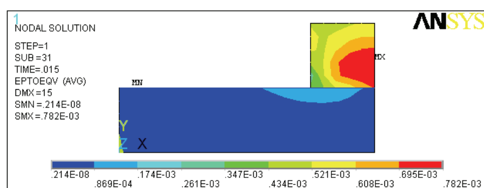


图 4-98 滑块内部等效应变场等值线图

7. 再次进入求解器，计算热传导过程

1）选择 Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 4-99 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

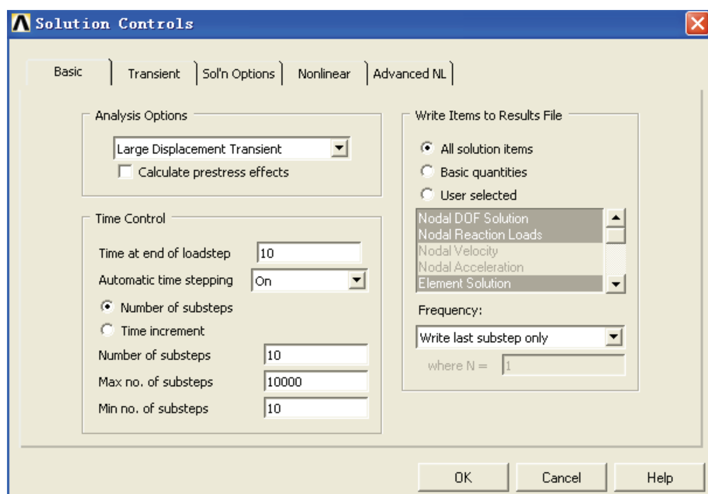


图 4-99 求解控制对话框

2）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

3）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

4）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save

Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 DOF solution Temperature TEMP，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-100 所示的 10s 后的温度场等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 4-101 所示的滑块内部等效应力场等值线图。

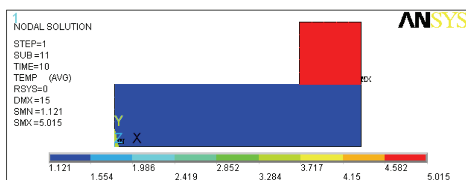


图 4-100　10s 后的温度场等值线图

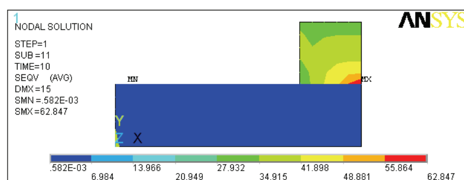


图 4-101　等效应力场等值线图

3）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：如果滑块长度有限，则不能按照平面应变模型进行求解，必须建立 3D 空间模型，读者可尝试求解之。

4.7.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE6                                   ！定义工作文件名
/TITLE，FRICTION HEATING OF A SLIDING BLOCK           ！定义工作标题

/PREP7                                                ！进入前处理器
ET，1，PLANE13                                        ！定义单元类型
ET，2，TARGE169
ET，3，CONTA171
KEYOPT，1，1，4                                       ！定义单元关键字
KEYOPT，1，3，0
KEYOPT，3，1，1
MP，EX，1，69000                                      ！输入材料性能参数
MP，DENS，1，2.7E-9
MP，ALPX，1，23.9E-6
MP，PRXY，1，0.3
MP，MU，1，0.2
MP，KXX，1，150
MP，C，1，9E8

/PNUM，LINE，1                                        ！显示线段编号
```




```
RECTNG,, 20,, 5                                  ! 生成矩形面
RECTNG,, 5, 5, 10
LESIZE, ALL, 1,,, 1, 1                           ! 设置单元等分数
AMESH, ALL                                       ! 对面进行网格划分
LPLOT                                            ! 显示线段
LSEL, S,,, 3                                     ! 选择线段
NSLL, S, 1                                       ! 选择线段上所有点
R, 1
TYPE, 2
ESURF                                            ! 生成表面单元
ALLSEL                                           ! 选择所有实体

LSEL, S,,, 5
NSLL, S, 1
TYPE, 3
ESURF                                            ! 生成表面单元
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU                                            ! 进入求解器
ANTYPE, TRANS                                    ! 指定分析类型为瞬态分析
NLGEOM, ON                                       ! 打开大应变选项
NROPT, UNSYM
TOFFSET, 460                                     ! 设置温度偏移量
TUNIF, 0.00                                      ! 施加均匀温度载荷
TIMINT, OFF, STRUC                               ! 关闭结构时间积分选项
TINTP,,,, 1.0
TIME, 1.5E-2                                     ! 指定计算终止时间
AUTOTS, ON                                       ! 开启自动时间步长
NSUBST, 30, 10000, 30                            ! 指定步长
OUTRES, ALL, -10                                 ! 设置输出控制选项
LSEL, S,,, 7
NSLL, S, 1
*DIM, PRESS, TABLE, 2, 1, 1, TIME                ! 创建数组
SF, ALL, PRES, %PRESS%                           ! 施加压力载荷
PRESS(1, 0, 1) = 0
PRESS(1, 1, 1) = 40
PRESS(2, 0, 1) = 40
PRESS(2, 1, 1) = 40
ALLSEL
LSEL, S,,, 6
NSLL, S, 1
D, ALL, UX, 15                                   ! 施加位移载荷
ALLSEL
ASEL, S,,, 1
NSLA, S, 1
D, ALL, UX, 0                                    ! 设置位移边界条件
D, ALL, UY, 0
ALLSEL
```

```
SOLVE                                             ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                            ! 进入后处理器
PLNSOL，TEMP                                      ! 绘制温度场等值线图
PLNSOL，S，X                                      ! 绘制 X 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                                      ! 绘制 Y 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Z                                      ! 绘制 Z 方向应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                                    ! 绘制等效应力等值线图
PLNSOL，EPTO， EQV                                ! 绘制等效应变等值线图
SAVE
FINISH

/SOLU                                             ! 进入求解器
TIME，10
AUTOTS，ON
TINTP，，，，1.0
NSUB，10，10000，10
OUTRES，ALL，LAST
SOLVE                                             ! 开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                            ! 进入后处理器
PLNSOL，TEMP                                      ! 绘制温度场等值线图
PLNSOL，S，EQV                                    ! 绘制等效应力等值线图
PLNSOL，EPTO， EQV                                ! 绘制等效应变等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                                        ! 退出 ANSYS
```

4.8 谱分析实例详解——地震位移谱作用下的板梁结构响应

4.8.1 问题描述

有一板梁结构如图 4-102 所示，计算在 Y 方向的地震位移谱作用下的构件响应情况。板梁结构相关参数见表 4-15，响应谱见表 4-16。

表 4-15 板梁结构几何及材料参数

板厚度 T/ mm	梁宽度 B/ mm	梁高度 H/ mm	梁截面面积 S/ mm^2	梁惯性矩 IZZ/ mm^4	梁惯性矩 IYY/ mm^4	弹性模量 E/ GPa	泊松比	密度 ρ/(kg/m^3)
2	4	3	12	16	9	200	0.3	7800

表 4-16　响应谱

频率/ Hz	位移/ mm
0.5	1.0
1.0	0.5
2.4	0.8
3.8	0.7
17	1.0
18	0.7
20	0.8
32	0.3

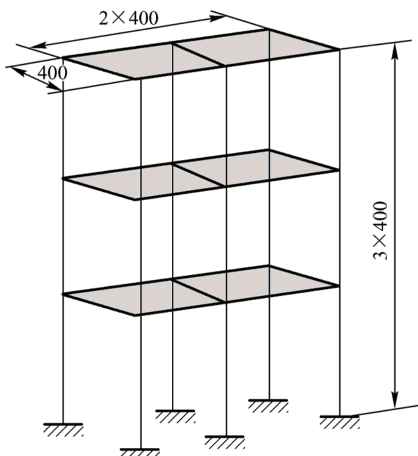


图 4-102　板梁结构示意图

4.8.2 问题分析

该问题属于单点响应谱分析问题。在分析过程中根据图 4-102 建立几何模型，并选择 BEAM188 梁单元和 SHELL181 壳单元分别模拟梁和板进行求解。

注意：ANSYS16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 BEAM4 梁单元和 SHELL63 壳单元。

4.8.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE7，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 SPECTRUM ANALYSIS OF A SHELL-BEAM STRUCTURE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell，3D　4node 181，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 4-103 所示，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam，2node 188，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、

Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Propeties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

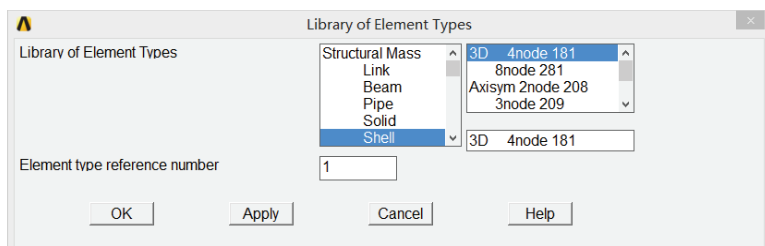


图 4-103　单元类型列表对话框

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Density 选项，出现 Density for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 7.8E3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Beam | Common Sections 命令，出现 Beam Tool 对话框。在 ID 输入栏中输入 1，在 Name 输入栏中输入 BEAM，在 Sub-Type 下拉菜单中选择矩形梁标志，在 B 输入栏中输入 0.004，在 H 输入栏中输入 0.003，如图 4-104 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框。在 Name 输入栏中输入 SHELL，在 ID 输入栏中输入 2，在 Thickness 输入栏中输入 0.002，其余选项采用默认设置，如图 4-105 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

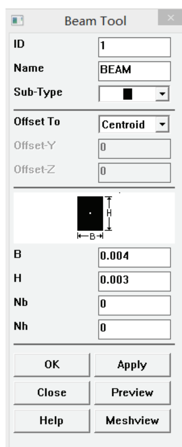


图 4-104　梁单元信息输入对话框

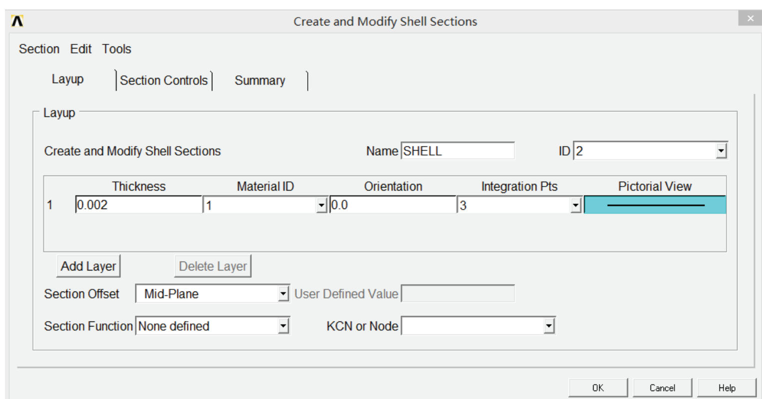


图 4-105　壳单元信息输入对话框

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，参照图 4-106 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

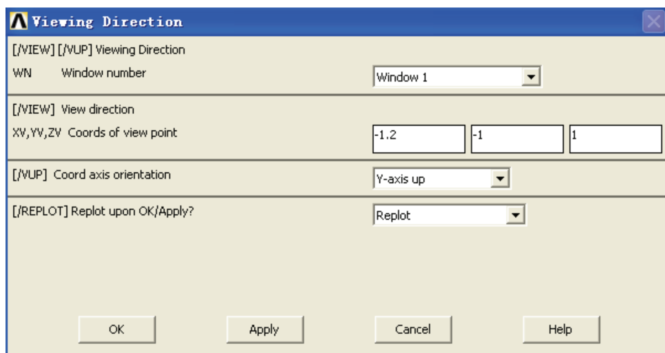


图 4-106 视图显示方向设置对话框

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints In Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：创建关键点。

3）参照上一步的操作，创建以下关键点编号及坐标：

2（0，0，0.4）；3（0，0，0.8）；4（0，0，1.2）

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | In Active Coord 命令，出现 Lines in Active 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 2，3，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 3，4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过关键点创建线段。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attributes 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，参照图 4-107 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置线段等分数。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines 命令，出现 Copy Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Lines 对话框，在 ITIME Number of copies 输入栏中输入 2，在第 DY Y-offset in active CS 输入栏中输入 0.4，如图 4-108 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines 命令，出现 Copy Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Lines 对话框，在 ITIME Number of copies 输入栏中输入 2，在 DX X-offset in active CS 输入栏中输入 0.4。单击 OK 按钮关闭该对话框。

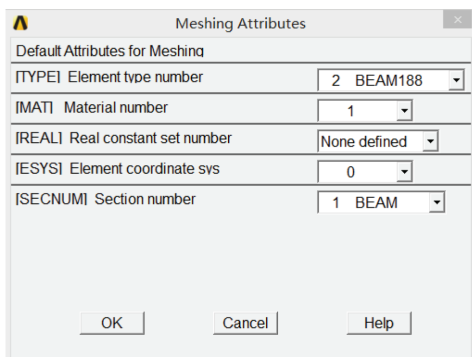


图 4-107 网格划分属性设置对话框

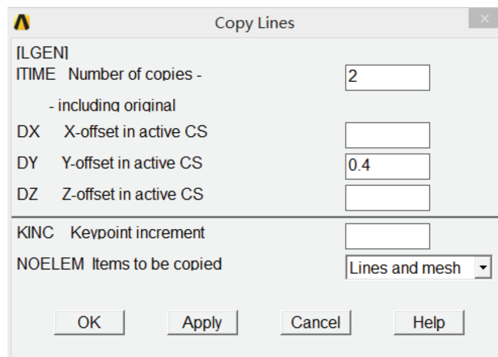


图 4-108 复制线段对话框

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.4，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择线段中点 X 坐标值为 0.4 的所有线段。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines 命令，出现 Copy Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Lines 对话框，在 ITIME Number of copies 输入栏中输入 2，在 DX X-offset in active CS 输入栏中输入 0.4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs 命令，出现 Create Areas Through 拾取菜单，在输入栏中输入 2，6，14，10，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过关键点生成面。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attributes 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 SHELL181，在［SECNUM］ Section number 下拉选框中选择 2 SHELL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | MenuSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 19，20，21，22，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L19、L20、L21、L22 划分为 5 等份。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

17）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Areas 命令，出现 Copy Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Areas 对话框，在 ITIME Number of copies 输入栏

中输入 2，在 DX　X-offset in active CS 输入栏中输入 0.4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Areas 命令，出现 Copy Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Areas 对话框，在 ITIME　Number of copies 输入栏中输入 2，在 DZ　Z-offset in active CS 输入栏中输入 0.4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Areas 命令，出现 Copy Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮，出现 Copy Areas 对话框，在 ITIME　Number of copies 输入栏中输入 2，在 DZ　Z-offset in active CS 输入栏中输入 0.8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

20）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label　Type of item to be merged 下拉选框中选择 All，其余选项采用默认设置，如图 4-109 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：合并同位置重复定义的实体（点、线、面，以及单元和节点）。

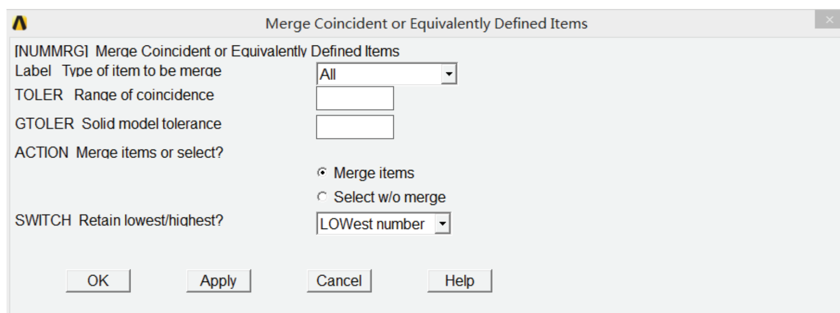


图 4-109　合并实体对话框

21）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label　Item to be compressed 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩实体编号。

22）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中分别输入-0.2、-0.9、0.4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置视图显示方向。

23）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口显示生成的有限元模型，如图 4-110 所示。

24）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-1.db，保存操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

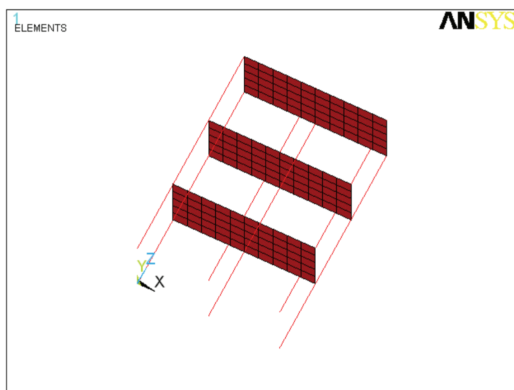


图 4-110 生成的有限元模型结果显示

提示：首先进行模态分析。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Modal Analysis 对话框，参照图 4-111 所示对其进行设置，单击 OK 按钮，出现 Block Lanczos Method 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

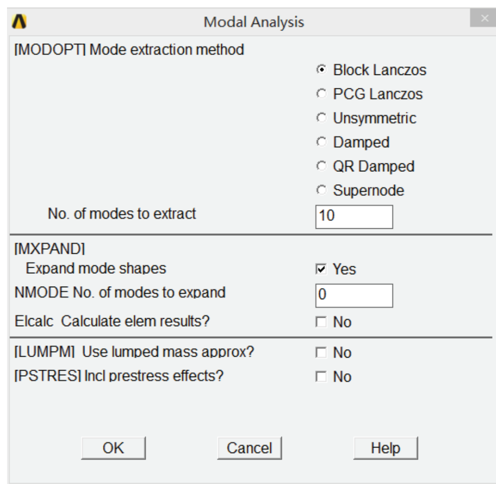


图 4-111 模态分析属性设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Z 坐标为 0 的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加位移约束。

5）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

6）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：进行模态分析。

7）选择 Main Menu | Finish 命令。

8）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Spectrum，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Analysis Options 命令，出现 Spectrum Analysis 对话框，参照图 4-112 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | Single Point | Setting 命令，出现 Settings for Single-Point Response Spectrum 对话框，参照图 4-113 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

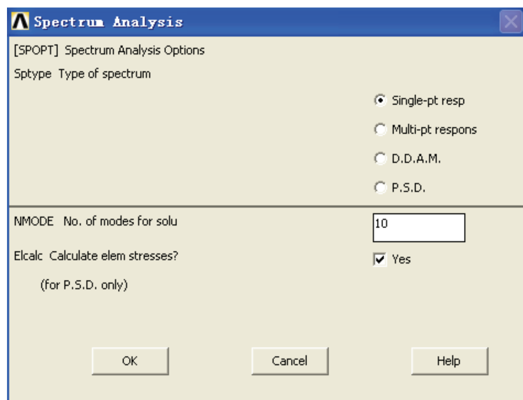


图 4-112　谱分析属性设置对话框

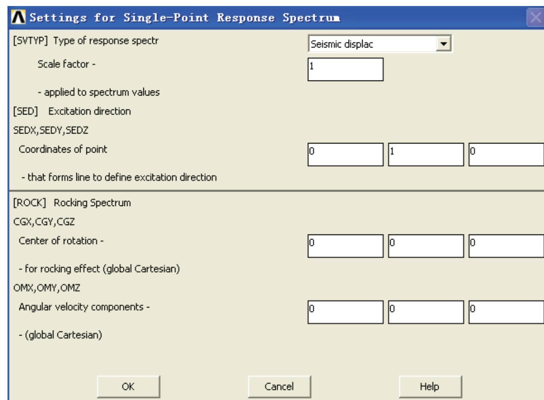


图 4-113　单点谱分析设置对话框

11）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | Single Point | Freq Table 命令，出现 Frequency Table 对话框，参照图 4-114 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | Single Point | Spectr Values 命令，出现 Spectrum Values-Damping Ratio 对话框，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Spectrum Values 对话框，参照图 4-115 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

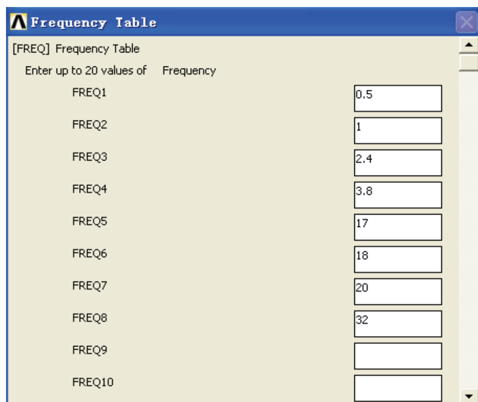


图 4-114　频率列表对话框

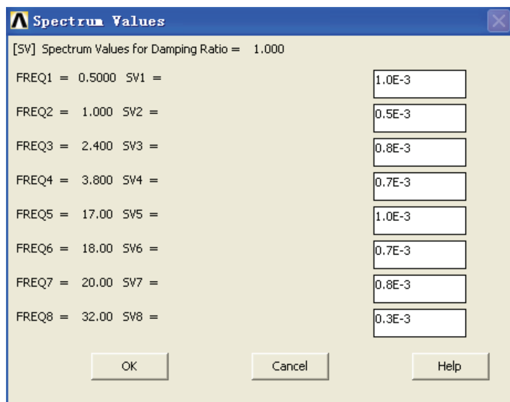


图 4-115　输入谱值对话框

提示：进行谱分析。

14）选择 Main Menu | Finish 命令。

15）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | ExpansionPass 命令，出现 ExpansionPass 对话框，选择［EXPASS］ Expansion pass，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | ExpansionPass | Single Expand | Expand Modes 命令，出现 Expand Modes 对话框，参照图 4-116 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：模态扩展分析。

19）选择 Main Menu | Finish 命令。

20）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Spectrum，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Spectrum | Single Point | Mode Combine | SRSS Method 命令，出现 SRSS Mode Combination 对话框，参照图 4-117 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

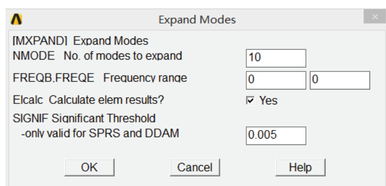


图 4-116　扩展模态设置对话框

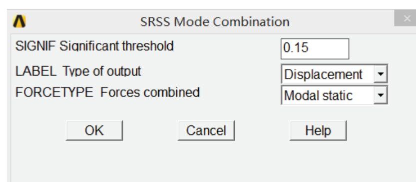


图 4-117　SRSS 模态复合方法设置对话框

22）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：模态合并分析。

23）选择 Main Menu | Finish 命令。

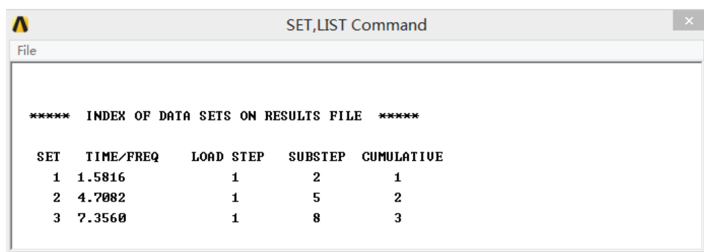
24）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

提示：若读入光盘中的数据文件（.DB 文件），需执行 Main Menu | General Postproc | Data & File Opts 命令读入相应的.rst 结果文件。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Results Summary 命令，ANSYS 显示窗口显示求解摘要，如图 4-118 所示。


SET,LIST Command

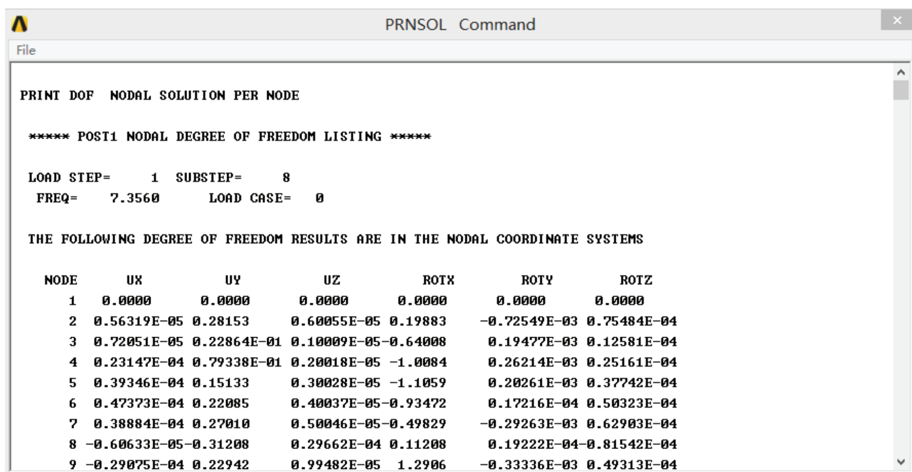
File

```
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

 SET   TIME/FREQ    LOAD STEP   SUBSTEP  CUMULATIVE
   1  1.5816             1          2          1
   2  4.7082             1          5          2
   3  7.3560             1          8          3
```

图 4-118　求解摘要显示

3）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框。选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 4-119 所示的节点位移求解结果。


PRNSOL Command

File

```
PRINT DOF  NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     8
  FREQ=    7.3560      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE NODAL COORDINATE SYSTEMS

   NODE      UX          UY          UZ          ROTX        ROTY        ROTZ
      1   0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000
      2  0.56319E-05 0.28153     0.60055E-05 0.19883    -0.72549E-03 0.75484E-04
      3  0.72051E-05 0.22864E-01 0.10009E-05-0.64008     0.19477E-03 0.12581E-04
      4  0.23147E-04 0.79338E-01 0.20018E-05 -1.0084     0.26214E-03 0.25161E-04
      5  0.39346E-04 0.15133     0.30028E-05 -1.1059     0.20261E-03 0.37742E-04
      6  0.47373E-04 0.22085     0.40037E-05-0.93472     0.17216E-04 0.50323E-04
      7  0.38884E-04 0.27010     0.50046E-05-0.49829    -0.29263E-03 0.62903E-04
      8 -0.60633E-05-0.31208     0.29662E-04 0.11208     0.19222E-04-0.81542E-04
      9 -0.29075E-04 0.22942     0.99482E-05  1.2906    -0.33336E-03 0.49313E-04
```

图 4-119　节点位移求解结果显示

4）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框。选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 4-120 所示的节点等效应力求解结果。

5）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All struc forc F，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 4-121 所示的反作用力求解结果。

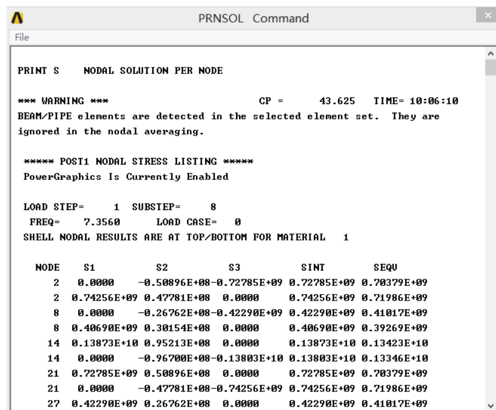


图 4-120 节点等效应力求解结果显示

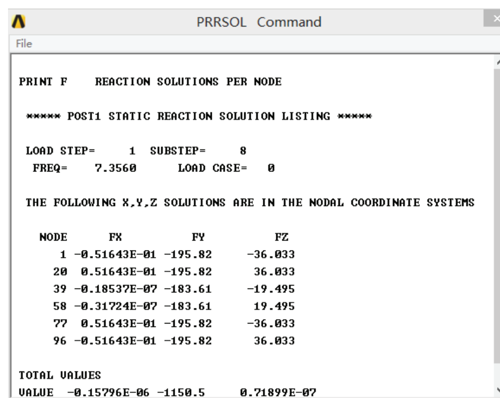


图 4-121 反作用力求解结果显示

6）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可调整板梁的结构或尺寸，建立有限元模型后再依据本例的求解思路对其进行求解，并对求解结果进行比较。

4.8.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE7                          ！定义工作文件名
/TITLE，SPECTRUM ANALYSIS OF A SHELL-BEAM STRUCTURE
                                             ！定义工作标题
/PREP7                                       ！进入前处理器
ET，1，SHELL181                              ！定义单元类型
ET，2，BEAM188
KEYOPT，1，3，2                              ！设置单元关键字
KEYOPT，2，3，3
MP，EX，1，2E11                              ！输入材料性能参数
MP，DENS，1，7.8E3
MP，PRXY，1，0.3
SECTYPE，1，BEAM，RECT，BEAM，0              ！定义梁单元几何信息
SECOFFSET，CENT
SECDATA，0.004，0.003
SECT，2，SHELL，，SHELL                      ！定义壳单元几何信息
SECDATA，0.002，1，0，3
SECOFFSET，MID
```

```
SECCONTROL，0，0，0，0，1，1，1

/VIEW，1，-1.2，-1，1                    ！设置视图显示方向
K，1                                     ！创建关键点
K，2,,，0.4
K，3,,，0.8
K，4,,，1.2
L，1，2                                  ！生成线段
L，2，3
L，3，4

TYPE，2
SECNUM，1
MAT，1
REAL，2
ESYS，0
LESIZE，ALL,,，6，1                      ！设置线段等分数
LMESH，ALL                               ！对线段进行网格划分
LGEN，2，ALL,,,，0.4,,，0                 ！生成线段
LGEN，2，ALL,,，0.4,,,，0
LSEL，S，LOC，X，0.4                     ！选择线段
LGEN，2，ALL,,，0.4,,,，0
LSEL，ALL
A，2，6，14，10                          ！生成面
TYPE，1
SECNUM，2
MAT，1
REAL，1
ESYS，0
LSEL，S,,，19，22
LESIZE，ALL,,，5，1
AMESH，1                                 ！对面进行网格划分
ALLSEL
AGEN，2，1,,，0.4                        ！生成面
AGEN，2，ALL,,,,，0.4
ASEL，S,,，1，2                          ！选择面
AGEN，2，ALL,,,,，0.8
ALLSEL
NUMMRG，ALL                              ！合并同位置实体
NUMCMP，ALL                              ！压缩实体编号
/VIEW,，-0.2，-0.9，0.4                  ！设置视图显示方向
EPLOT                                    ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                    ！进入求解器
ANTYPE，MODAL                            ！模态分析
MODOPT，LANB，10                         ！子空间模态提取法，提取 10 阶模态
NSEL，S，LOC，Z
D，ALL,,,,,，ALL                         ！施加位移约束
```



```
ALLSEL
SOLVE                                                    ! 进行求解
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE，SPECTR                                           ! 谱分析
SPOPT，SPRS，10，YES                                     ! 单点响应谱
SVTYP，3                                                 ! 位移谱
SED，，1                                                 ! 设置谱的激励方向
FREQ，0.5，1.0，2.4，3.8，17，18，20，32                  ! 设置频率
SV，1，1.0E-3，0.5E-3，0.8E-3，0.7E-3，1.0E-3，0.7E-3，0.8E-3，0.3E-3
                                                         ! 设置与频率点相联系的谱值
SOLVE
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE，MODAL                                            ! 模态分析
EXPASS，ON                                               ! 打开模态扩展开关
MXPAND，10，，，YES，0.005                               ! 指定扩展模态数
SOLVE
SAVE
FINISH

/SOLU
ANTYPE，SPECTR                                           ! 谱分析
SRSS，0.15，DISP                                         ! 合并模态平方和的方根
SOLVE
SAVE
FINISH

/POST1                                                   ! 进入 POST1 后处理器
SET，LIST
SET，LAST
PRNSOL，DOF
PRNSOL，S，PRIN
PRRSOL，F                                                ! 列表显示支反力结果
FINISH
/EXIT，ALL                                               ! 退出 ANSYS
```

第 5 章　ANSYS 16.1 结构非线性分析及实例详解

本章导读：

本章主要介绍各种类型的非线性分析的工程应用实例，包括几何非线性问题的求解、材料非线性问题的求解以及状态非线性问题的求解，通过对各种实例进行具体、详细的分析求解，不仅使读者熟悉非线性问题分析的基本方法和基本步骤，同时也为读者提供了大量的工程结构非线性问题的求解思路。

5.1　非线性分析基本过程

5.1.1　结构非线性分析

1．非线性结构的定义

在日常生活中，经常会遇到结构非线性情况。例如，用钉书器钉书，金属订书针将永久地弯曲成一个不同的形状（见图 5-1a）；如果你在一个木架上放置重物，随着时间的推移，它将越来越下垂（见图 5-1b）；当在汽车或卡车上装货时，它的轮胎和路面间的接触将随货物重量的变化而变化（见图 5-1c）。如果将上面例子的载荷变形曲线画出来，可以发现它们都显示了非线性结构的基本特征——变化的结构刚度。

2．非线性行为的原因

引起结构非线性的原因很多，主要可分为以下 3 种类型：

（1）状态变化（包括接触）

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松弛的，也可能是绷紧的；轴承套可能是接触的，也可能是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变而突然变化。状态改变或许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能是由某种外部原因引起的（如在冻土中的紊乱热力学条件）。接触是一种很普遍的非线性行为，是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集。

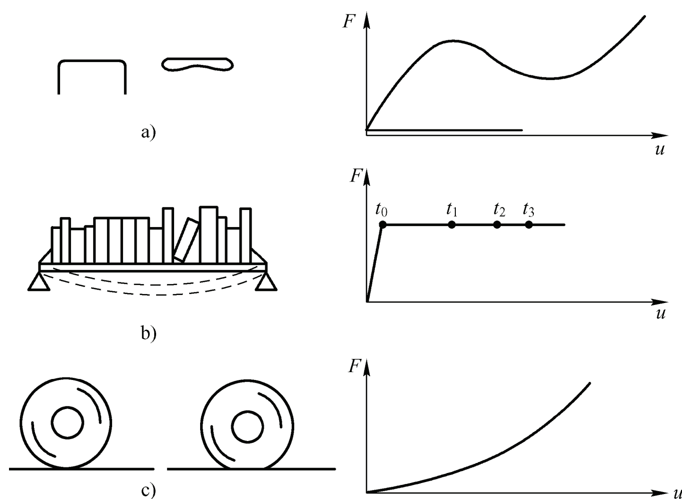


图 5-1　非线性结构行为的普通例子

a) Staple　b) Book shelf　c) Pneumatic tires

（2）几何非线性

结构如果经受大变形，其变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。例如图 5-2 所示的钓鱼杆，在轻微的载荷作用下，会产生很大的变形。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲导致动力臂明显缩短，致使杆在较高载荷下刚度不断增加。

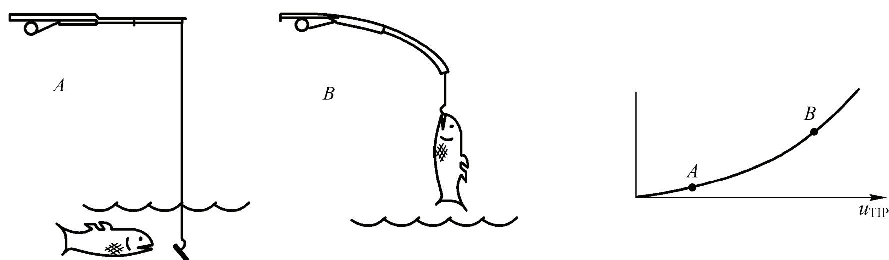


图 5-2　钓鱼杆示范几何非线性

（3）材料非线性

非线性的应力-应变关系是结构非线性的常见原因。许多因素可以影响材料的应力-应变性质，包括加载历史（如在弹-塑性响应状况下）、环境状况（如温度）、加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）等。

3．非线性结构分析中应注意的问题

（1）牛顿—拉普森方法

ANSYS 程序的方程求解器可以计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而，非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程来表示，需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

一种近似的非线性求解是将载荷分成一系列的载荷增量。可以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前，程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可

避免地随着每一个载荷增量积累误差，最终导致结果失去平衡，如图 5-3a 所示。

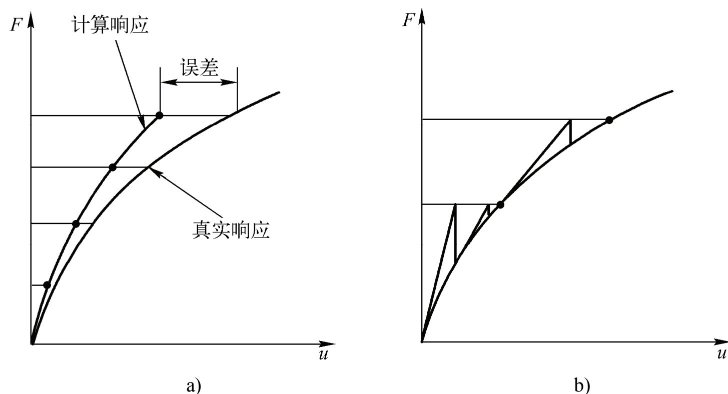


图 5-3　纯粹增量近似与牛顿-拉普森近似

a) 纯粹增量式求解　b) 牛顿-拉普森迭代求解（2 个载荷增量）

ANSYS 程序通过使用牛顿-拉普森平衡迭代克服了这种困难，在某个容限范围内，它使每一个载荷增量的末端解都达到平衡收敛。图 5-3b 描述了在单自由度非线性分析中牛顿-拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，牛顿-拉普森方法估算出残差矢量，这个矢量是回复力（对应于单元应力的载荷）和所加载荷的差值。之后程序使用非平衡载荷进行线性求解，并且核查收敛性。如果不满足收敛准则，则重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS 程序提供了一系列方法来增强问题的收敛性，如自适应下降、线性搜索、自动载荷步以及二分法等，可以采用这些方法来加强问题的收敛性，如果不能得到收敛，那么程序将依据用户指示或者继续计算下一个载荷或者终止。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析，如果仅仅使用牛顿-拉普森方法，正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵，从而导致严重的收敛问题。对于这样的情况，可以激活另外一种迭代方法——弧长方法，来帮助稳定求解。弧长方法使牛顿-拉普森平衡迭代沿一段弧收敛，这样即使当正切刚度矩阵的值为零或负值时，也往往阻止发散。图 5-4 为这种迭代方法的示意图。

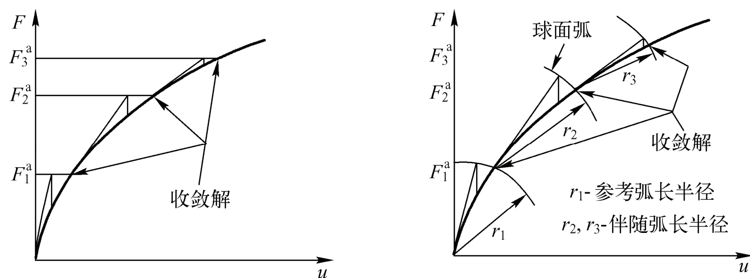


图 5-4　传统的牛顿-拉普森方法与弧长方法的比较

（2）非线性求解的操作级别

非线性求解分成三个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。

“顶层”级别由在一定“时间”范围内用户明确定义的载荷步组成，假定载荷是线性变

化的。

在每一个载荷步内，通过逐步加载可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。

在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得问题的收敛解。

图 5-5 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。

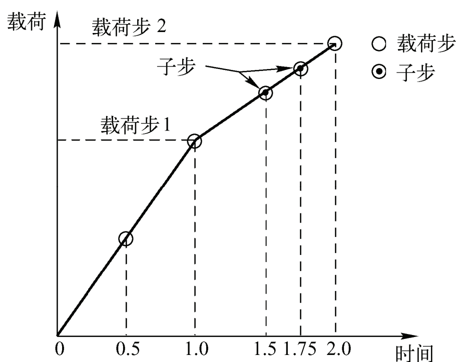


图 5-5　载荷步、子步及“时间”

（3）收敛准则

当确定收敛准则时，ANSYS 程序会给出一系列的选择：可以将收敛检测建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。 另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对于多自由度问题，同样也存在收敛准则的选择问题。

当确定收敛准则时，以力为基础的收敛容限提供了收敛的绝对量度，而以位移为基础的收敛容限仅提供了收敛的相对量度。因此，应当使用以力或力矩为基础的收敛容限。如果需要，可以增加以位移或转动为基础的收敛检查，但是通常不单独使用它们。

图 5-6 说明了一种单独使用位移收敛检测导致出错的情况。在第二次迭代后，尽管问题仍旧远离真正的解，但由于计算出的位移很小，很可能被误认为是收敛解。要防止这样错误的发生，应当使用力收敛检测。

（4）保守行为与非保守行为：过程依赖性

如果通过外部载荷输入系统的总能量，当载荷移去时系统复原，则称这个系统是保守的。如果能量被系统消耗掉（如由于塑性应变或滑动摩擦），则称该系统是非保守的，图 5-7 所示是一个非保守系统的例子。

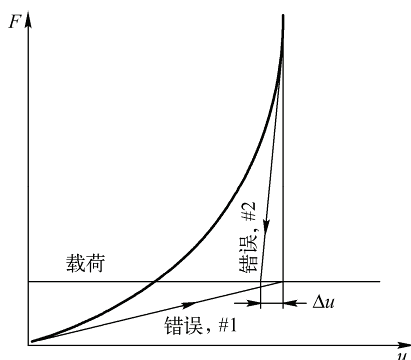


图 5-6　完全依赖位移收敛检测产生错误结果显示

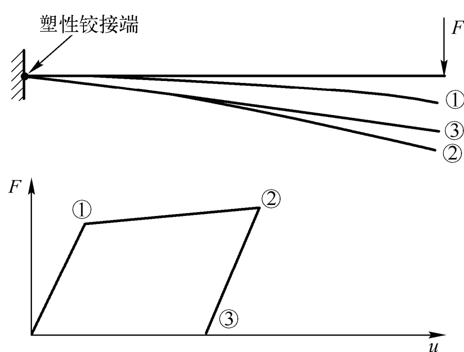


图 5-7　非保守（过程相关的）过程

一个保守系统的分析是与过程无关的，通常可以任何顺序和任何数目的增量加载而不影响最终计算结果。而一个非保守系统的分析是过程相关的，必须紧紧跟随系统的实际加载历史，以获得精确的求解结果。过程相关问题通常要求缓慢加载（即使用许多子步）到最终的载荷值。

（5）子步

当使用多个子步时，需要考虑精度和代价之间的平衡：更多的子步骤通常导致较高的精度，但以增加运行时间为代价。ANSYS 提供两种方法来控制子步数。

1）子步数或时间步长。

通常可以通过指定实际的子步数，也可以通过指定时间步长来控制子步数。如果结构在整个加载历史期间显示出高度的非线性特点，并且能够确保问题的解答必定收敛，则可以使用任意小的时间步长，并且对所有的载荷步使用这一步长。但要注意的是，必须提供足够大的平衡迭代数以使计算能够达到问题的收敛解。

2）自动时间步长。

ANSYS 程序基于结构的特性和系统的响应来调整时间步长。如果结构的行为从线性到非线性变化，或者想要在系统响应的非线性部分期间变化时间步长，就可以激活自动时间步长以便根据需要调整时间步长，获得精度和代价之间的良好平衡。如果不能确保问题成功收敛，则可以使用自动时间分步激活 ANSYS 程序的二分法。

二分法提供了一种对收敛失败自动矫正的方法。无论何时只要平衡迭代收敛失败，二分法将把时间步长分成两半，然后从最后收敛的子步自动重启动，如果已二分的时间步再次收敛失败，二分法将再次分割时间步长然后重启动，持续这一过程直到获得收敛或到达所设定的最小时间步长。

（6）载荷和位移方向

当结构经历大变形时，应该考虑到载荷的变化。在许多情况中，无论结构如何变形，施加在系统中的载荷保持恒定的方向；而在另一些情况中，载荷将随着单元方向的改变而变化。

ANSYS 程序对这两种情况都可以建模。加速度和集中力将不管单元方向的改变而保持它们最初的方向，表面载荷作用在变形单元表面的法向，且可被用来模拟跟随力。图 5-8 给出了恒力和跟随力的示意图。

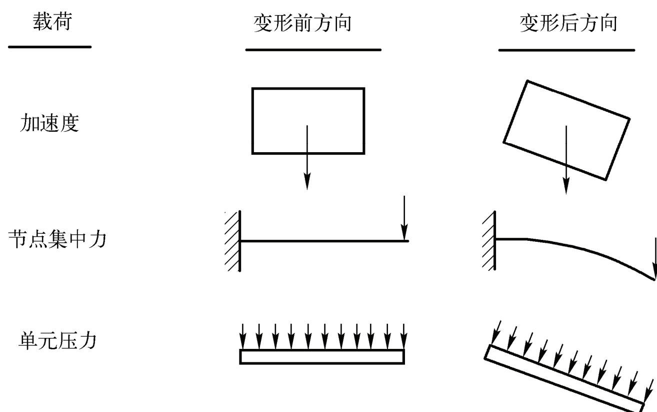


图 5-8　变形前后载荷方向

提示：ANSYS 在大变形分析中不修正节点坐标系方向，因此计算出的位移在最初的方向上输出。

（7）非线性瞬态过程的分析

用于分析非线性瞬态行为的过程，与线性静态行为的处理相似：以步进增量加载，程序在每一步中进行平衡迭代。静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应，因此，在瞬态过程分析中，“时间”总是表示实际的时序。自动时间分步和二等分特点同样也适用于瞬态过程分析。

5.1.2 几何非线性分析

随着位移增长，一个有限单元已移动的坐标可以以多种方式改变结构的刚度。一般来说，这类问题总是非线性的，需要进行迭代获得一个有效的解。

1．大应变效应

一个结构的总刚度依赖于它组成单元的方向和刚度。当一个单元的节点经历位移后，那个单元对总体结构刚度的贡献可以以两种方式改变。首先，如果这个单元的形状改变，它的单元刚度将改变，如图 5-9a 所示。其次，如果这个单元的取向改变，它的单元刚度也将改变，如图 5-9b 所示。小变形和小应变分析假定位移小到足够使所得到的刚度改变无足轻重。这种刚度不变假定意味着使用基于最初几何形状的结构刚度进行一次迭代足以计算出小变形分析中的位移。相反，大应变分析说明由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响，且反之亦然，所以在大应变分析中需要多次迭代求解来得到正确的位移。ANSYS 程序通过执行 NLGEOM，ON 命令，来激活大应变效应。对于大多数实体单元（包括所有的大应变和超弹单元），以及部分的壳单元，大应变特性是可用的。

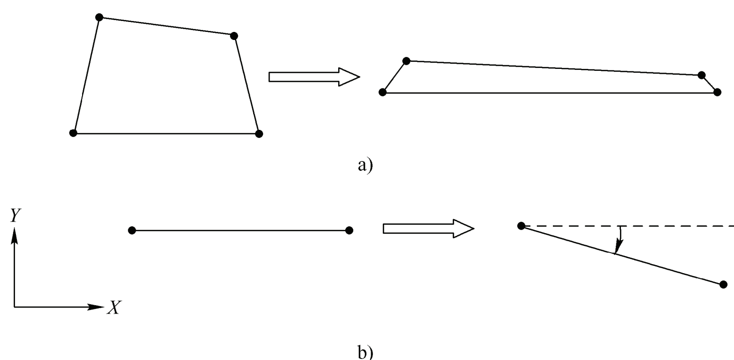


图 5-9 大应变和大转动

a) 大应变能影响局部（单元）刚度 b) 大转动能影响单元刚度对总体刚度的贡献

大应变处理对一个单元经历的总应变没有理论限制。然而，应限制应变增量以保持精度。因此，总载荷应当被分成几个较小的载荷步。无论何时，当系统是非保守系统，如在模型中有塑性或摩擦，或者有多个大位移解存在，使用小的载荷增量具有双重重要性。

2．大应变建模讨论

（1）应力-应变

在大应变求解中，所有应力-应变输入和结果将依据真实应力和真实（或对数）应变。（一维时，真实应变表示为 $\varepsilon = \ln\left(l/l_0\right)$，对于响应的小应变区，真实应变和工程应变基本上是一致的。）要从小工程应变转换成对数应变，使用 $\varepsilon_{ln} = \ln\left(1+\varepsilon_{eng}\right)$；要从工程应力转换成真实应力，使用 $\sigma_{true} = \sigma_{eng}\left(1+\varepsilon_{eng}\right)$。（这种应力转化仅对不可压缩塑性应力-应变数据有效。）

（2）单元形状

在大应变分析迭代过程中，任何表现低劣的单元形状（大的纵横比、过度的顶角以及具有负面积的已扭曲单元）将是“有害”的。因此，必须注意单元的原始形状和单元已扭曲的形状（除了探测出具有负面积的单元外，ANSYS 程序对于求解中遇到的低劣单元形状不发出任何警告，必须进行人工检查）。如果已扭曲的网格是不能接受的，可以人工改变开始网格形状以产生合理的最终结果（参见图 5-10）。

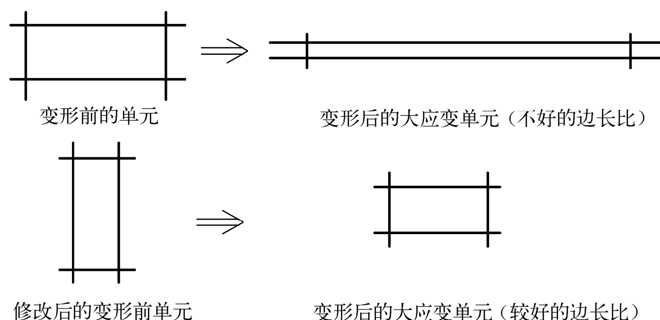


图 5-10　在大应变分析中通过改变初始单元形状避免低劣单元形状的出现

3．小应变大转动

某些单元支持大的转动，但不支持大的形状改变。一种称作大挠度的具有大应变特性的受限形式对这类单元是适用的。在一个大挠度分析中，单元的转动可以任意大，但是应变假定是小的。大挠度效应（没有大的形状改变）在 ANSYS/Linear Plus 程序中是可用的。（在 ANSYS/Mechanical，以及 ANSYS/Structural 产品中，对于支持大应变特性的单元，大挠度效应不能独立于大应变效应被激活。）在所有梁单元和大多数壳单元中，以及许多非线性单元中这个特性是可用的。通过执行 NLGEOM，ON 命令来激活那些支持这一特性的单元中的大挠度效应。

4．应力刚化

结构的面外刚度可能大大地受该结构中面内应力状态的影响。面内应力和横向刚度之间的耦合，通称应力刚化。在薄的具有高应力的结构中，如缆索或薄膜中，是最明显的。一个鼓面，当它绷紧时会产生垂向刚度，这是应力强化结构的一个普通的例子。尽管应力刚化理论假定单元的转动和应变是小的，在某些结构的系统中（见图 5-11a），刚化应力仅可以通过大挠度分析得到。在其他系统中（见图 5-11b），刚化应力可采用小挠度或线性理论得到。

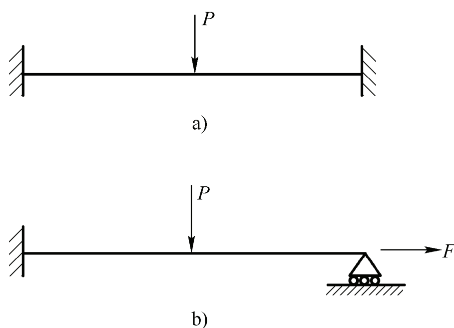


图 5-11　应力刚化梁

要在第二类系统中使用应力刚化，必须在第一个载荷步中执行 PSTRES，ON 命令。ANSYS 程序通过生成和使用一个称作“应力刚化矩阵”的辅助刚度矩阵来考虑应力刚化效应。尽管应力刚度矩阵是使用线性理论得到的，但由于应力（应力刚度矩阵）在每次迭代之间是变化的，因此它是非线性的。

在大变形分析中若包含应力刚化效应，ANSYS 程序将把应力刚度矩阵附加到主刚度矩阵上，这样会在具有大应变或大挠度性能的大多数单元中产生一个“近似的”协调切向刚度矩阵。

5．在大变形分析中何时使用应力刚化

- 对于大多数实体单元，应力刚化效应是与问题相关的；在大变形分析中，使用应力刚化可能提高也可能降低收敛性。在大多数情况下，首先应该尝试一个应力刚化效应关闭的分析。如果用户正在模拟一个受到弯曲或拉伸载荷的薄膜结构，当用应力刚化关闭时遇到收敛困难，则可尝试打开应力刚化。
- 应力刚化不建议用于包含“不连续单元”（由于状态改变，刚度上经历突然不连续变化的非线性单元，如各种接触单元，SOLID65 等）的结构。对于这样的问题，当应力刚化打开时，结构刚度上的不连续性很容易导致求解“胀破”。
- 对于杆、梁和壳单元，在大挠度分析中通常应使用应力刚化。实际上，在应用这些单元进行非线性屈曲分析时，只有当打开应力刚化时才得到精确的解。但是，当使用杆、梁或者壳单元来模拟刚性连杆、耦合端或者结构刚度的大变化时，不应使用应力刚化。

6．旋转软化

旋转软化是指通过动态质量效应调整（软化）旋转物体的刚度矩阵。在小位移分析中这种调整近似于由于大的环形运动而导致几何形状改变的效应。通常它和预应力一起使用，这种预应力由旋转物体的离心力所产生。它不应和其他变形如非线性、大挠度和大应变一起使用。旋转软化使用 OMEGA，KPSIN 命令执行。

5.1.3 材料非线性分析

1．概述

（1）塑性定义

塑性是指在某种给定载荷下，材料产生永久变形的特性。对于大多的工程材料来说，当

其内部应力低于比例极限时，应力-应变关系是线性的。在其应力低于屈服点时，表现为弹性行为，也就是说，当移走载荷时，其应变也完全消失。

由于屈服点和比例极限相差很小，因此在 ANSYS 程序中，假定它们相同。在应力-应变曲线中，低于屈服点的称为弹性部分，超过屈服点的称为塑性部分，也称作应变强化部分。塑性分析中考虑了塑性区域的材料特性。

（2）路径相关性

既然塑性是不可恢复的，那么它就与加载历史有关，这类非线性问题称作与路径相关的或非保守的非线性。

路径相关性是指对一种给定的边界条件，可能有多个正确的解，为了得到真正正确的结果，必须按照系统真正经历的加载过程加载。

（3）率相关性

塑性应变的大小可能是加载速度的函数，如果塑性应变的大小与时间无关，这种塑性称作率无关的塑性，相反，与时间有关的塑性称作率相关的塑性。

大多数材料都有某种程度上的率相关性，但在大多数静力分析中所经历的应变率范围较小，两者的应力-应变曲线差别不大，所以在一般的分析中，总是认为塑性是率无关的。

（4）工程应力、应变与真实的应力、应变

塑性材料的数据一般以拉伸的应力-应变曲线形式给出。材料数据可以是工程应力（P/A_0）与工程应变（$\Delta l/l_0$），也可以是真实应力（P/A）与真实应变（$Ln\left(1/l_0\right)$）。

大应变塑性分析中一般采用真实的应力-应变数据，而小应变分析中一般采用工程的应力-应变数据。

（5）激活塑性

当材料中的应力超过屈服点时，塑性被激活（也就是说，有塑性应变发生）。而屈服应力本身可能是下列某个参数的函数。

- 温度
- 应变率
- 应变历史
- 侧限压力（静水压应力）
- 其他参数

2．相关塑性理论

（1）屈服准则

对于单向受拉试样，可以通过简单的比较轴向应力与材料的屈服应力来确定是否有塑性变形发生，但是，对于一般的应力状态，是否到达到屈服点并不能这样直接判断。

屈服准则是一个与单轴测试的屈服应力相关的应力状态的标量表示。因此，知道了应力状态和屈服准则，程序就能确定是否有塑性应变产生。

屈服准则的应力值有时候也称作等效应力，一个通用的屈服准则是 Von Mises 屈服准则，当等效应力超过材料的屈服应力时，将会发生塑性变形。

可以在主应力空间中画出 Mises 屈服准则，如图 5-12 所示。

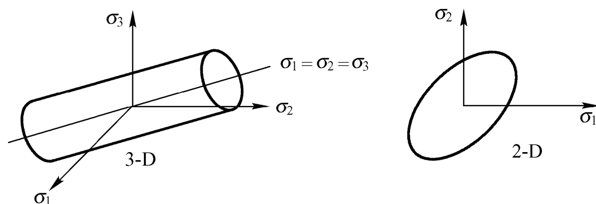


图 5-12 主应力空间中的 Mises 屈服准则

在三维空间中，屈服面是一个以 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ 为轴的圆柱面，在二维平面中，屈服面是一个椭圆，在屈服面内部的任何应力状态，都是弹性的，屈服面外部的任何应力状态都会引起屈服。

提示：静水压应力状态（$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$）不会导致屈服：屈服与静水压应力无关，而只与偏差应力有关，因此，$\sigma_1=180$，$\sigma_2=\sigma_3=0$ 的应力状态比 $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=180$ 的应力状态接近屈服。Mises 屈服准则是一种除了土壤和脆性材料外典型使用的屈服准则，在土壤和脆性材料中，屈服应力是与静水压应力（侧限压力）有关的，侧限压力越高，发生屈服所需要的剪应力越大。

（2）流动准则

流动准则描述了发生屈服时塑性应变的方向，也就是说，流动准则描述了单个塑性应变分量和屈服应力的关系。

一般来说，流动方程是塑性应变在垂直于屈服面的方向发展的屈服准则中推导出来的。这种流动准则称作相关流动准则，如果不用其他的流动准则（从其他不同的函数推导出来），则称作不相关的流动准则。

（3）强化准则

强化准则描述了初始屈服准则和塑性应变之间的关系。

一般来说，屈服面的变化是应变历史的函数，在 ANSYS 程序中，使用了两种强化准则：等向强化和随动强化。

等向强化是指屈服面以材料中所做塑性功的大小为基础在尺寸上进行扩张。对 Mises 屈服准则来说，屈服面在所有方向均匀扩张，如图 5-13 所示。

由于等向强化，在受压方向的屈服应力等于受拉过程中所达到的最高应力。

随动强化假定屈服面的大小保持不变而仅在屈服的方向上移动，当某个方向的屈服应力升高时，其相反方向的屈服应力应该降低，如图 5-14 所示。

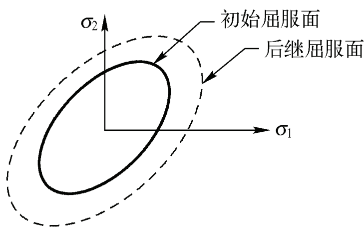


图 5-13 等向强化时的屈服面变化图

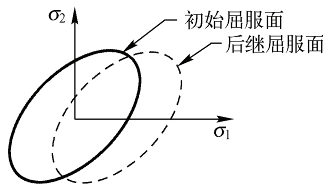


图 5-14 随动强化时的屈服面变化图

在随动强化中，由于拉伸方向上屈服应力的增加会导致压缩方向上屈服应力的降低，所以在对应的两个屈服应力之间总存在一个差值，初始各向同性的材料在屈服后将不再是各向同性的。

3．塑性选项

ANSYS 程序提供了多种塑性材料选项，在此主要介绍 4 种典型的材料选项。

- 经典双线性随动强化　　BKIN
- 双线性等向强化　　BISO
- 多线性随动强化　　MKIN
- 多线性等向强化　　MISO

（1）经典双线性随动强化（BKIN）

因为使用一个双线性来表示应力-应变曲线，所以有两个斜率，即弹性斜率和塑性斜率。由于随动强化的 Von Mises 屈服准则被使用，因此应考虑鲍辛格效应，此选项适用于遵守 Von Mises 屈服准则，初始为各向同性材料的小应变问题，这包括大多数金属材料。

需要输入的材料参数是屈服应力和切线模量，可以定义包含高达 6 个不同温度点下的材料参数曲线。

提示：弹性模量也可以是与温度相关的；切线模量不可以是负数，也不能大于弹性模量。

（2）双线性等向强化（BISO）

该模型使用双线性来表示应力-应变曲线，并使用等向强化的 Von Mises 屈服准则，这个选项一般用于初始各向同性材料的大应变问题。需要输入的常数与 BKIN 选项相同。

（3）多线性随动强化（MKIN）

该模型使用多线性来表示应力-应变曲线和模拟随动强化效应，并使用 Von Mises 屈服准则，对使用双线性选项（BKIN）不能足够表示应力-应变曲线的小应变分析是有用的。

需要输入包括最多 5 个应力-应变数据点（用数据表输入），可以定义 5 条不同温度下的数据曲线。

在使用多线性随动强化时，可以使用与 BKIN 相同的步骤来定义材料特性，不同的是在数据表中输入的常数不同。下面是一个用命令流定义多线性随动强化的标准输入。

```
MPTEMP，，20，100
MPDATA，EX，3，，30E9，25E9
TB，MKIN，3
TBTEMP，，STRAIN
TBDATA，，0.01，0.05，0.1
TBTEMP，20
TBDATA，，300E6，370E6，380E6
TBTEMP，100
TBDATA，，250E6，310E6，330E6
```

（4）多线性等向强化（MISO）

该模型使用多线性来表示使用 Von Mises 屈服准则的等向强化的应力-应变曲线，它适用于比例加载的情况和大应变分析。

需要输入最多 100 个应力-应变数据点，最多可以定义 20 条不同温度下的数据曲线。

其材料特性的定义步骤如下：

- 定义弹性模量；
- 定义 MISO 数据表；
- 为输入的应力-应变数据指定温度值；
- 输入应力-应变数据；
- 图形显示材料的应力-应变曲线。



与 MKIN 数据表不同的是，MISO 的数据表对不同的温度可以有不同的应变值，因此，每条温度曲线有它自己的输入表。

4．使用塑性的注意事项

（1）ANSYS 输入

当使用 TB 命令选择塑性选项和输入所需常数时，应该注意：

- 常数应该是塑性选项所期望的形式。例如，我们总是需要应力和总的应变，而不是应力与塑性应变。
- 如果进行大应变分析，那么应力-应变曲线数据应该是真实应力-真实应变。

对于双线性选项（BKIN、BISO），输入屈服应力和切线模量可以按下述方法来决定：如果材料没有明显的屈服应力，通常以产生 0.2%的塑性应变所对应的应力作为屈服应力，而切线模量可以通过拟合实验曲线得到。

（2）其他有用的载荷步选项

- 使用子步数。既然塑性是一种与路径相关的非线性，那么需要使用许多载荷增量来加载。
- 激活自动时间步长。
- 如果在分析所经历的应变范围内，应力-应变曲线是光滑的，则使用预测器选项能够极大地降低塑性分析中的总体迭代次数。

（3）输出量

在塑性分析中，对每个节点都可以输出下列量：

- EPPL——塑性应变分量。
- EPEQ——累加的等效塑性应变。
- SEPL——根据输入的应力-应变曲线估算出的相对于 EPEQ 的等效应力。
- HPRES——静水压应力。
- PSV——塑性状态变量。
- PLWK——单位体积内累加的塑性功。

如果一个单元的所有积分点都是弹性的（EPEQ＝0），那么节点的弹性应变和应力从积分点外插得到，如果任一积分点是塑性的（EPEQ>0），那么节点的弹性应变和应力实际上是积分点的值，这是程序的默认情况。

（4）程序使用中的一些基本原则

下面的这些原则应该有助于执行一个精确的塑性分析。

- 输入的塑性材料常数必须能够足以描述所经历的应力或应变范围内的材料特性。

- 缓慢加载，应该保证在一个时间步内，最大的塑性应变增量小于 5%。一般来说，如果 Fy 是系统刚开始屈服时的载荷，那么在塑性范围内的载荷增量应近似为：0.05Fy——对于用面力或集中力加载的情况；Fy——对于用位移加载的情况。
- 当模拟类似梁或壳的几何体时，必须有足够的网格密度，在厚度方向必须至少有 2 个单元。
- 除非那个区域的单元足够大，应该避免应力奇异。由于建模而导致的应力奇异有：单点加载或单点约束；凹角；模型之间采用单点连接；单点耦合或接触条件。
- 如果模型的大部分区域都保持在弹性区内，那么可以采用下列方法来降低计算时间：在弹性区内仅仅使用线性材料特性；在塑性部分使用子结构。

（5）加强收敛性的方法

可以采用下述方法来加强问题的收敛性。

- 使用小的时间步长。
- 如果自适应下降因子是关闭的，打开它；相反，如果它是打开的，且割线刚度正在被连续使用，那么关闭它。
- 使用线性搜索，特别是当大变形或大应变被激活时。
- 预测器选项有助于加速缓慢收敛的问题，但也可能使其他的问题变得不稳定。
- 可以将默认的牛顿-拉普森选项转换成修正的（MODI）或初始刚度（INIT）牛顿-拉普森选项，这两个选项比全牛顿-拉普森选项更稳定（需要更多的迭代），但这两个选项仅在小挠度和小应变塑性分析中有效。

5.1.4 状态非线性分析

1．接触分析概述

接触问题是一种高度非线性行为，需要较大的计算资源，为了进行切实有效的计算，理解问题的特性和建立合理的模型非常重要。

接触问题存在两个难点：其一，无法在求解问题之前确定接触区域，而接触区域随载荷、材料、边界条件和其他因素而变；其二，大多的接触问题需要计算摩擦，而摩擦使问题的收敛变得困难。

（1）一般接触分类

接触问题分为两种基本类型：刚体-柔体的接触和柔体-柔体的接触。在刚体-柔体的接触问题中，接触面的一个或多个被当作刚体（与它接触的变形体相比，有大得多的刚度），一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，问题可以被假定为刚体-柔体的接触，许多金属成形问题可归为此类接触；另一类为柔体-柔体的接触，是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体（有近似的刚度）。

（2）ANSYS 接触方式

ANSYS 16.1 支持 5 种接触方式：点-点、点-面、线-线、线-面、面-面、每种接触方式都使用相应的接触单元。

1）点-点接触单元

点-点接触单元主要用于模拟点-点的接触行为，为了使用点-点的接触单元，需要预先知道接触位置，这类接触问题只适用于接触面之间有较小相对滑动的情况，如果两个面上的节

点一一对应，相对滑动可以忽略不计，两个面挠度（转动）保持小量，那么可以用点-点的接触单元来求解面-面的接触问题。过盈装配问题是一个用点-点的接触单元来模拟面面接触问题的典型例子。在 ANSYS 16.1 中，CONTA178 是一种典型的点-点接触单元。



2）点-面接触单元

CONTA175 是一种典型的点-面接触单元，主要用于对点-面的接触行为进行建模。该单元支持大的相对滑动和大变形。

如果通过一组节点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点-面的接触单元来模拟面-面的接触问题，面既可以是刚性体也可以是柔性体，这类接触问题的一个典型例子是插头插到插座里。

使用这类接触单元，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格。

ANSYS 程序的点-面接触单元允许下列非线性行为：有大变形的面-面接触分析；接触和分开；库仑摩擦滑动；热传递。

3）线-线接触单元

线-线接触单元主要用于 3D 线-线的接触行为建模，例如两根梁的相互接触（包括平行接触和交叉接触）。在 ANSYS 16.1 中，CONTA176 是一种典型的 3D 线-线接触单元，它可以附着于梁单元或管单元的表面并支持低阶或高阶的接触面单元，允许接触部位出现大的位移或滑动。

4）线-面接触单元

线-面接触单元主要用于线-面的接触行为建模，可以模拟 3D 梁或壳边界与实体单元或壳单元的接触行为。在 ANSYS 16.1 中，CONTA177 是一种典型的 3D 线-面接触单元，它支持低阶或高阶的接触面单元，允许接触部位出现大的位移或滑动。

5）面-面接触单元

ANSYS 支持刚体-柔体的面-面接触，刚性面被当作“目标”面，分别用 TARGE169 和 TARGE170 单元来模拟 2D 和 3D 的“目标”面，柔性体的表面被当作“接触”面，用 CONTA171、CONTA172、CONTA173、CONTA174 单元来模拟。一个目标单元和一个接触单元称作一个“接触对”，程序通过一个共享的实常数号来识别“接触对”。

面-面接触单元有如下优点：支持低阶和高阶单元；支持有大滑动和摩擦的大变形；提供工程需要的更好的接触结果，例如法向压力和摩擦应力；没有刚体表面形状的限制；与点-面接触单元比，需要较多的接触单元；允许多种建模控制，如绑定接触；渐变初始渗透；目标面自动移动到初始接触位置；平移接触面；支持“死活”单元。

下面针对应用较为广泛的面-面接触分析过程进行介绍。

2．面-面接触分析

在涉及两个边界的接触问题中，需要把一个边界作为目标面而把另一个作为接触面，对刚体-柔体的接触，目标面总是刚性的，接触面总是柔性面。

面-面接触分析的一般步骤：

- 建立模型，划分网格
- 识别接触对
- 指定目标面和接触面

- 定义目标面
- 定义接触面
- 设置单元关键字和实常数
- 定义 / 控制刚性目标面的运动
- 给定边界条件
- 定义求解选项和载荷步
- 求解接触问题
- 查看求解结果

步骤 1：建立模型，划分网格

与其他分析过程一样，包括设置单元类型、实常数、材料特性等。可使用适当的单元类型给接触体划分网格。

步骤 2：识别接触对

通过定义目标单元和接触单元生成接触对。目标单元和接触单元通过共享的实常数号联系起来。

由于几何模型和潜在变形的多样性，有时候一个接触面的同一区域可能和多个目标面产生接触关系，在这种情况下，应该定义多个接触对。每个接触对有不同的实常数号。

步骤 3：指定目标面和接触面

接触单元被限制不得穿透目标面。但是，目标单元可以穿透接触面。对于刚体-柔体接触，目标面总是刚体表面，而接触面总是柔体表面。对于柔体-柔体接触，选择哪一个面作为接触面或目标面可能会引起穿透量的不同，从而影响求解结果。这可参照下面的论述：

① 如凸面预期与一个平面或凹面接触，则平面/凹面应当指定为目标面。

② 如一个面有较密的网格，而相比之下，另一个面网格较疏，则较密网格的面应当是接触面，而较疏网格的面则为目标面。

③ 如一个面比另一个面刚度大，则较柔的面应当指定为接触面，而较刚的面则为目标面。

④ 如果高阶单元位于一个外表面，而低阶单元位于另一个面，则前者应指定为接触面，后者则为目标面。

⑤ 如果一个面明显比另一个面大（如一个面包围其他面），则较大的面应指定为目标面。

不对称接触定义为所有的接触单元在一个面上，而所有的目标单元在另一个面上的情况，有时候也称为“单向接触”，这在模拟面-面接触时最为有效。但是，在某些环境下，不对称接触不能满足要求。在这些情况下，可以把任一个面指定为目标面和接触面，然后在接触的面之间生成两组接触对（或仅是一个接触对，如自接触情况），这就称为对称接触，有时也称为“双向接触”。显然，对称接触不如非对称接触效率高。但是，许多分析要求应用对称接触（典型的情况是为了减少穿透）。要求对称接触的情况如下：

① 接触面和目标面区分不太清楚。

② 两个面都有十分稀疏的网格。对称接触算法比非对称接触算法在更多的面上施加了接触约束条件。

如果两个面上的网格相同并且足够密，则对称接触算法可能不会显著改变运行效果，而事实上可能更费 CPU 时间。在这种情况下，拾取一个面为目标面，而另一个面为接触面。

在任何接触模型中，可以混合不同的接触对：刚体-柔体或柔体-柔体接触对；对称接触或非对称接触。但在一个接触对中只能有一种类型。

步骤 4：定义目标面

目标面可以是 2D 或 3D 的刚体或柔体的面。对于柔体目标面，一般应用 ESURF 命令沿现有网格的边界生成目标单元。也可以按相同的方法生成柔体接触面。用户不应当应用下列刚性目标面作为柔体接触面：ARC、CARC、CIRC、CYL1、CONE、SPHE 或 PILO。对于刚体目标面的情况论述如下：



在 2D 情况下，目标面的形状可以通过一系列直线、圆弧和抛物线来描述，所有这些都可以用 TARGE169 来表示。另外，可以使用它们的任意组合来描述复杂的目标面。在 3D 情况下，目标面的形状可以通过三角面、圆柱面、圆锥面和球面来推述，所有这些都可以用 TARGE170 来表示，对于一个复杂的、任意形状的目标面，应该使用三角面来建模。

一个目标面可能由两个或多个不连续的区域组成。用户应该尽可能地通过定义多个目标面，来使接触区域限于局部（每个目标面有一个不同的实常数号）。刚性面上的形状不限制，不要求光滑。但是，要保证刚性目标面上曲面的离散足够。过粗的网格离散可能导致收敛问题。如果刚性面有一个尖锐的凸角，求解大的滑动问题时很难获得收敛结果。为了避免这些建模问题，可在实体模型上使用线或面的倒角来使尖角光滑化，或者在曲率突变的区域使用更细的网格或使用高阶单元。

在定义目标面时应注意：

① 使用线或面的倒角使实际接触区域的尖角光滑化，或者在曲率突然变化的区域使用更细的网格。

② 不能使用镜面对称技术来映射圆、圆柱、圆锥或球面到对称平面的另一边。

对于 2D 接触问题，当沿着目标面从第一个节点移向第二个节点时，变形体的接触单元必须位于目标面的右边。对于 3D 接触问题，目标三角形单元号应该使目标面的外法线方向指向接触面，外法线通过右手原则来定义。

采用下列命令检查法线方向，显示单元坐标系：

COMMAND：/PSYMS，ESYS，1

GUI：Utility Menu | Plotctrls | Symbols

如果单元法向不指向接触面，采用下列命令反转单元表面法线方向：

COMMAND：ESURF，，REVE

GUI：Main Menu | Preprocossor | Create | Element | On free surf

步骤 5：定义柔性体的接触面

ANSYS 程序使用 2D 接触单元 CONTA171、CONTA172 或 3D 接触单元 CONTA173、CONTA174 定义柔性体的接触面。

程序通过在变形体表面生成接触单元来定义接触表面，接触单元与下面覆盖的变形体单元具有相同的几何特性，二者必须处于同一阶次（低阶或高阶）。

与目标面单元一样，必须定义接触面的单元类型，然后选择正确的实常数号，最后生成接触单元。

步骤 6：设置实常数和单元关键字

程序使用多达 35 个实常数和多个单元关键字来控制面-面接触单元的接触行为。下面针

对比较常用的实常数及单元关键字进行简要介绍。

（1）实常数

R1 和 R2 用于定义目标单元几何形状。

FKN 用于定义法向接触刚度因子。

FTOLN 是基于单元厚度的一个系数，用于计算允许的穿透。

ICONT 用于定义初始闭合因子。

PINB 用于定义“Pinball”区域。

PMIN 和 PMAX 用于定义初始穿透的容许范围。

TAUMAX 用于指定最大接触摩擦应力。

CNOF 用于指定施加于接触面的正或负的偏移值。

FKOP 用于定义在接触分开时施加的刚度系数。

FKT 用于定义切向接触刚度。

COHE 用于定义滑动抗力粘聚力。

FACT 用于定义静摩擦系数和动摩擦系数的比率。

DC 用于定义摩擦幂衰减系数。

PPCN 用于定义压力渗透准则。

FPAT 用于定义流体渗透时间。

COR 用于定义恢复系数。

FDMN 用于定义正常稳定阻尼因子。

FDMT 用于定义次要稳定阻尼因子。

TMND 用于定义结合温度。

FHTG 用于指定摩擦耗散能量的热转换率。

SBCT 用于指定 Stefan-Boltzman 常数。

RDVF 用于指定辐射观察系数。

FWGT 用于指定在接触面和目标面之间热分布的权重系数。

实常数 FKN、FTOLN、ICONT、PINB、PMAX、PMIN、FKOP、FKT 及 FPAT 的取值可以为正也可以为负，程序将正值作为比例因子，将负值作为真实值，例如 ICONT=0.1 表明初始间隙是 0.1 倍的下面覆盖层单元的厚度。-0.1 表明真实间隙是 0.1，如果下面覆盖层单元是超单元，则将接触单元的最小长度作为厚度。

在模型中，如果单元尺寸变化很大，而且在实常数如 ICONT、FTOLN、PINB、PMAX、PMIN 中应用比例系数，则可能会出现问题。因为从比例系数得到的实际结果，取决于下层单元的厚度，这就可能引起大、小单元之间的重大变化。如果出现这一问题，需用绝对值代替比例系数。

（2）单元关键字

每种接触单元都有相应的关键字，对于大多的接触问题，默认的关键字是合适的，而在某些情况下，可能需要改变默认值，来控制接触行为。下面是可以控制接触行为的一些关键选项：

自由度	KEYOPT（1）
接触算法（罚函数+拉格朗日乘子或罚函数）	KEYOPT（2）

存在超单元时的应力状态（仅 2D）	KEYOPT（3）
接触检测点的位置（仅低阶接触单元）	KEYOPT（4）
CNOF 自动调整	KEYOPT（5）
时间步控制	KEYOPT（7）
伪接触预防	KEYOPT（8）
初始穿透或间隙的影响	KEYOPT（9）
法向和切向接触刚度修正方法控制	KEYOPT（10）
壳的厚度影响	KEYOPT（11）
接触面行为（粗糙、绑定等）	KEYOPT（12）



● 选择接触算法

对于面-面接触单元，程序可以使用扩张的拉格朗日算法或罚函数方法，通过使用单元关键字 KEYOPT（2）来指定。扩张的拉格朗日算法是为了找到精确的拉格朗日乘子而对罚函数修正项进行反复迭代，与罚函数的方法相比，拉格朗日方法不易引起“病态”条件，对接触刚度的敏感度较小，然而，在有些分析中，扩张的拉格朗日方法可能需要更多的迭代，特别是在变形后网格变得太扭曲时。使用拉格朗日算法的同时应使用实常数 FTOLN。FTOLN 为拉格朗日算法指定容许的最大渗透，如果程序发现渗透大于此值时，即使不平衡力和位移增量已经满足了收敛准则，总的求解仍被当作不收敛处理，FTLON 的默认值为 0.1，可以改变这个值，但要注意，如果此值太小，可能会造成太多的迭代次数或者不收敛。

● 决定接触刚度

所有的接触问题都需要定义接触刚度，两个表面之间穿透量的大小取决于接触刚度。过大的接触刚度可能会引起总刚矩阵的“病态”，从而造成收敛困难。一般来说，应该选取足够大的接触刚度以保证接触穿透小到可以接受，但同时又应该让接触刚度足够小，不致引起总刚矩阵的“病态”而保证收敛性。

ANSYS 程序根据下伏柔体单元的材料特性，来估计一个默认的接触刚度值。用户可用实常数 FKN 来为接触刚度指定一个比例因子或指定一个绝对值。比例因子一般在 0.01 和 10 之间；对于大变形问题，选 1 是比较好的；而对于弯曲为主的问题，通常为 0.01～0.1。用户应当总是检验以使穿透到达极小值，而又避免过多的迭代次数。

提示： FTOLN 和 FKN 从一个荷载步到另一个荷载步中，都可以修改，也可以在重启动中修改。这时，必须定义 KEYOPT（10）=1，2。

为了确定一个较好的接触刚度值，可能需要一些经验。用户可以按下面的步骤来进行尝试：

开始时取一个较低的值。低估值要比高估值好，因为由一个较低的接触刚度导致的穿透问题比过高的接触刚度导致的收敛性困难，低估值要容易解决。

对前几个子步进行计算分析，直到最终荷载的一个比例（刚好完全建立接触）。

检查每一子步中的穿透量和平衡迭代次数。如果总体收敛困难是由过大的穿透引起的（而不是由不平衡力和位移增量引起的），那么可能低估了 FKN 的值，或者是将 FTOLN 的值取得太小。如果总体的收敛困难是由于不平衡力和位移增量达到收敛值时需要过多的迭代次数，而不是由于过大的穿透量引起的，那么 FKN 的值可能被高估。

按需要调整 FKN 或 FTOLN 的值，重新进行完整的分析。

提示：如果穿透控制变成总体平衡迭代中的主因（如果为使问题收敛到穿透容差内，比收敛到不平衡力的容差内，需要更多的迭代），用户应该增大 FTOLN 值，以允许更多的穿透，或增大 FKN。

- 选择摩擦类型

在基本的库仑摩擦模型中，两个接触面在开始相互滑动之前，在它们的界面上会有相应的剪应力产生，一旦剪应力超过此值后，两个表面之间将开始相互滑动，摩擦系数可以是任一非负值。程序默认值为表面之间无摩擦，对 rough 或 bonded 接触（KEYOPT（2）=1 或 3），程序将不管给定的摩擦系数值而认为摩擦阻力无限大。

程序提供了一个不考虑接触压力的大小而人为指定最大等效剪应力的选项，如果等效剪应力达到此值时，滑动发生，如图 5-15 所示，通过设置常数 TAUMAX（默认为 1.0E20）指定接触界面上最大许可剪应力，这种限制剪应力的情况一般用于接触压力非常大的时候，以至于用库仑理论计算出的界面剪应力超过了材料的屈服极限。TAUMAX 的一个合理上限估值为 $\sigma_y/\sqrt{3}$（σ_y 是接触表面附近材料的 Von Mises 屈服应力）。

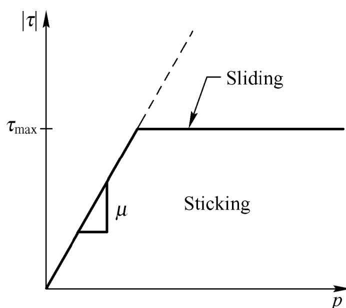


图 5-15　摩擦模式

下面介绍静、动摩擦系数。

摩擦系数依赖于接触面的相对滑动速度，通常静摩擦系数高于动摩擦系数。

ANSYS 提供了如下表示的指数衰减摩擦模型：

$$\mu = M_U \times (1+(FACT-1)\exp(-D_C \times V_{rel})$$

其中：

μ 为摩擦系数；

M_U 为动摩擦系数，用 MP 命令输入；

FACT 是静摩擦系数与动摩擦系数之比，默认为最小值 1.0；

D_C 为衰减系数，默认为 0.0，单位为 time/length；

V_{rel} 是 ANSYS 计算的滑动速度。

如果知道静、动摩擦系数和至少一个数据点（μ_1，V_{rel}），则可以确定摩擦衰减系数为：

$$D_C = \frac{1}{V_{rel}} \times \ln\left[\frac{\mu_1 - M_U}{(FACT-1)\times M_U}\right]$$

如果不指定衰减系数，且 FACT 大于 1.0，当接触进入滑动状态时，摩擦系数会从静摩擦系数突变到动摩擦系数，这种行为会导致收敛困难，所以不建议采用。

下面介绍对称、不对称求解器。

对无摩擦、粗糙和绑定接触，接触单元刚度矩阵是对称的。而涉及摩擦的接触问题产生一个不对称的刚度。在每次迭代使用不对称的求解器，比对称的求解器需要更多的计算时间，因此 ANSYS 程序采用对称化算法，通过采用这种算法求解大多数摩擦接触问题，能够使用对称系统的求解器来求解。如果摩擦应力在整个位移场内有相当大的影响，并且摩擦应

力的大小高度依赖于求解过程，则对刚度阵的任何对称近似都可能导致收敛性降低。在这种情况下，选择不对称求解选项（NROPT，UNSYM）来改善收敛性。

● 选择检查接触与否的位置

接触检查点位于接触单元的积分点上，在积分点上，接触单元不渗透进入目标面，然而，目标面能渗透进入接触面，如图 5-16 所示。

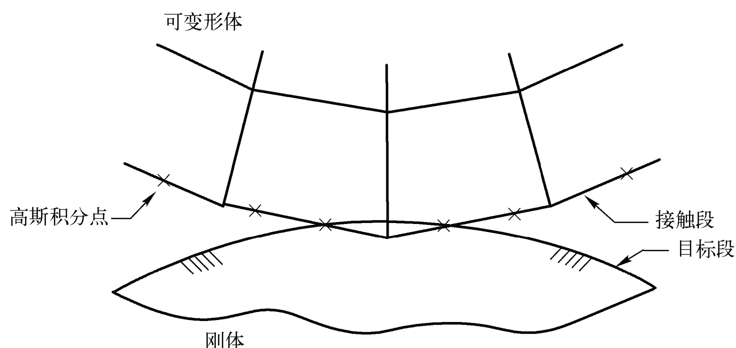


图 5-16　接触检查点位于高斯积分点上

ANSYS 面-面接触单元使用 GAUSS 积分点作为默认值，GAUSS 积分点通常会比 Newton-Cotes/robotto 节点积分项产生更精确的结果，Newton-Cotes/robotto 使用节点本身作为积分点，通过 KEYOPT（4）来选择。

● 调整初始接触条件

在动态分析中，刚体运动一般不会引起问题，然而在静力分析中，当物体没有足够的约束时会产生刚体运动，有可能引起错误而终止计算。在仅仅通过接触的出现来约束刚体运动时，必须保证在初始几何体中，接触对是接触的，然而这可能会遇到以下问题：刚体外形常常是复杂的，很难决定第一个接触点发生的位置；即使实体模型是在初始接触状态，在网格划分后由于数值舍入误差，两个面的单元网格之间也可能会产生小的缝隙；接触单元的积分点和目标单元之间可能有小的缝隙。同理，在目标面和接触面之间可能发生过大的初始渗透，在这种情况下，接触单元可能会高估接触力，导致不收敛或接触面之间脱离开接触关系。定义初始接触也许是建立接触分析模型时最重要的方面，因此，程序提供了几种方法来调整接触对的初始接触条件。

使用实常数 ICONT 来指定一个好的初始接触环。初始接触环是指沿着目标面的“调整环”的深度，如果没有人为指定 ICONT 的值，程序会根据几何尺寸来给 ICONT 提供一个较小值，任何落在“调整环”区域内的接触检查点将被自动移到目标面上，（如图 5-17a 所示）建议使用一个小的 ICONT 值，否则，可能会发生大的不连续（如图 5-17b 所示）。

使用实常数 PMIN 和 PMAX 来指定初始容许的渗透范围。当指定 PMAX 或 PMIN 后，在开始分析时，程序会将目标面移到初始接触状态，如果初始渗透大于 PMAX，程序会调整目标面的初始渗透，接触状态的初始调节仅仅通过平移来实现。

初始状态调整是一个迭代过程，程序最多进行 20 次迭代，如果目标面不能进入可接受的渗透范围，程序会给出一个警告信息，此时需要调整初始几何模型。

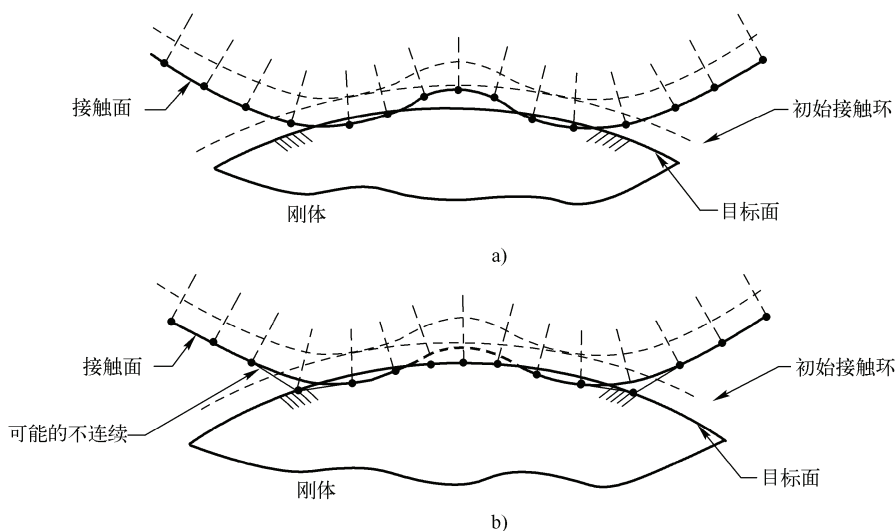


图 5-17　用 ICONT 进行接触面的调整

图 5-18 给出了一个初始接触调整迭代失败的例子。目标面的 UY 被约束住，因此，初始接触唯一允许的调整是在 X 方向，然而，在这个问题中，刚性目标面在 X 方向的任何运动都不会引起初始接触。

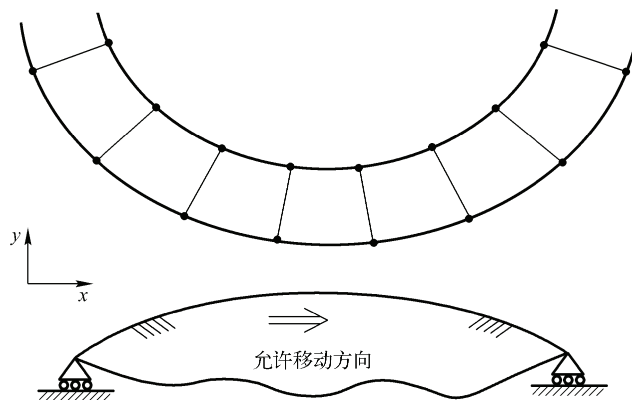


图 5-18　一个初始调整失败的例子

可以通过设置 KEYOPT（9）=1 来消除初始渗透，如图 5-19 所示。

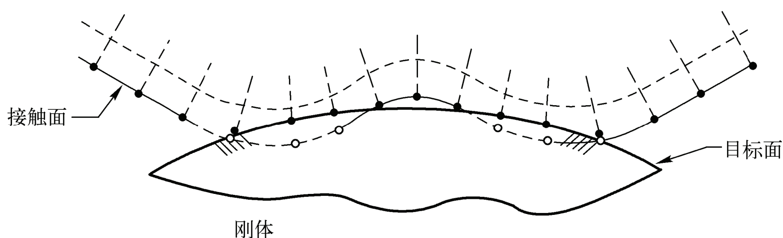


图 5-19　消除初始渗透

在某些情况下，例如过盈装配问题，希望有过度的渗透，为了缓解收敛性困难，在第一个载荷步中设置 KEYOPT（9）=2 来使过度渗透渐进到 0，如图 5-20 所示。当使用这种方法时，在第一个载荷步中不要给定其他任何载荷。

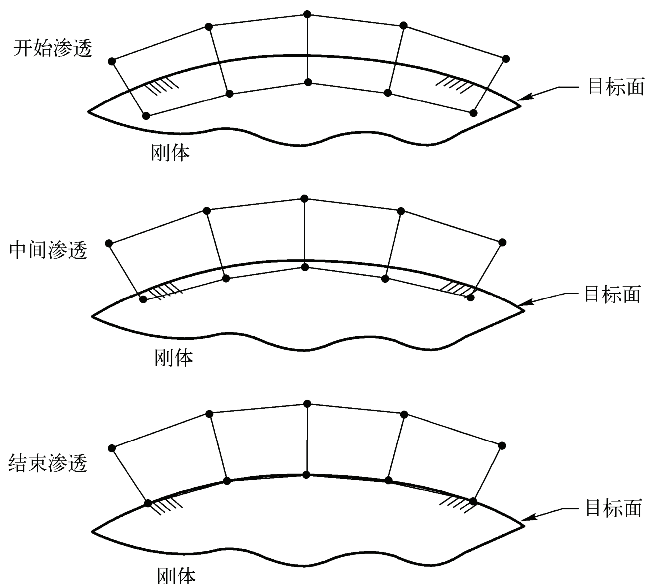


图 5-20　渐进初始渗透

● 选择表面作用模式

通过设置 KEYOPT（12）来选择作用模式。

KEYOPT（12）=0：法向单边接触。

KEYOPT（12）=1：粗糙接触，用来模拟无滑动的、表面相当粗糙的摩擦接触问题，这种设置对应于摩擦系数无限大。

KEYOPT（12）=2：不分开的接触，用来模拟那种一旦接触就再不分开的问题，这种不分开是对于法向接触而言，切向允许有相对滑动。

KEYOPT（12）=3：绑定接触，用来模拟那种接触一旦发生，在所有方向都被绑定的问题，一旦接触就再也不能脱开也不允许有相对滑动。

● 考虑厚度影响

ANSYS 程序可以用 KEYOPT（11）来考虑壳（2D 和 3D）和梁（2D）的厚度。默认情况下，程序不考虑单元厚度；当 KEYOPT（11）=1 时，则考虑梁或壳的厚度，从底面或顶面来计算接触距离，建模时要考虑到厚度，记住刚性目标面会向任一边移动半个梁或壳单元的厚度，当使用 SHELL181 单元时，在变形期间厚度的变化也将被考虑。

● 使用时间步长控制

时间步长控制是一个自动时间步长特征，这个特征用于预测接触单元的状态。使用 KEYOPT（7）来控制时间步长。KEYOPT（7）=0 时，不提供控制；KEYOPT（7）=1 时，如果一次迭代期间有太大的渗透发生或者接触状态突然变化，则进行时间步长二分；KEYOPT（7）=2 时，对下一个子步预测一个合理的时间增量；KEYOPT（7）=3 时，对下

一个子步预测一个最小的时间增量。

● 使用“死活”单元选项

面-面接触单元允许激活或“杀死”单元，即可以在分析的某一阶段中“杀死”某个单元而在以后的阶段再激活它，这个特征对于模拟复杂的金属成形过程非常有用，例如回弹模拟常常需要在成形过程的后期移走刚性工具。

步骤 7：控制刚性目标面的运动

通过“pilot”节点来定义整个刚性目标面的运动。

“pilot”节点的厚度代表整个刚性面的运动，可以在“pilot”节点上给定边界条件（位移、初速度）、集中载荷等，为了考虑刚体的质量，可以在“pilot”节点上定义一个质量单元。

步骤 8：施加边界条件

加载过程与其他的分析类型相同。

步骤 9：定义求解载荷步选项

接触问题的收敛性随具体问题的不同而不同，下面列出了一些典型的在大多数面-面的接触分析中推荐使用的选项：

- 时间步长必须足够小以描述适当的接触。如果时间步长太大，则接触力的光滑传递会被破坏，设置精确时间步长可信赖的方法是打开自动时间步长。
- 如果在迭代期间接触状态变化，可能发生不连续，为了避免收敛太慢，使用修改的刚度矩阵，将牛顿-拉普森选项设置成 FULL，不要使用自适应下降因子。
- 设置合理的平衡迭代次数，一个合理的平衡迭代次数通常在 25 和 50 之间。
- 因为大的时间增量会使迭代趋向于不稳定，可使用线性搜索选项来使计算稳定化。
- 打开时间步长预测器选项，大转动和动态分析中需关闭。

步骤 10：求解

求解过程设置与一般的非线性问题求解过程相同。

步骤 11：检查结果

后处理过程设置与一般的非线问题后处理过程相同。可以在通用后处理器（POST1）或时间历程后处理器（POST26）中查看结果。

3．热接触模拟

可以应用面-面接触单元，结合热-结构耦合场实体单元，来模拟在接触面之间的热传导。为了激活结构自由度和热自由度，要设置 KEYOPT（1）=1。支持下面的热接触特性：

- 两个接触面之间的热接触传导。
- 从一个“自由面”到周围，或两个小间隙分离面之间的热对流（“近场”对流）。
- 从一个“自由面”到周围，或两个小间隙分离面之间的热辐射（“近场”辐射）。
- 由摩擦耗散而产生的热。
- 热通量输入。

（1）热接触行为与接触状态

每个接触对可覆盖一个或多个热接触特性。激活哪个特性取决于接触状态。

- 闭合接触：热接触传导在两个接触面间传热。
- 摩擦滑动：摩擦耗散能量，在接触面和目标面上生成热。
- 近场接触：考虑了接触面和目标面之间的热对流和热辐射。

● 自由面接触：考虑了接触面和周围之间的热对流和热辐射。

（2）自由热表面

如果要模拟自由表面热对流、自由表面热辐射或施加了热流值的表面，用户可定义自由热表面。自由热表面可以是一个接触面而无相应的目标面（即无目标单元的接触对）。也可以设置目标单元类型定义的 KEYOPT（3）=1 来定义一个自由热表面。在设置了这个 KEYOPT 时，只要检测到接触张开，就要考虑自由表面辐射和对流。这种情况下，在接触面和目标面之间无对流或辐射热传递。



（3）目标面上的温度

对于界面热传导、近场热传导或近场辐射，需要求解接触面和目标面的温度。在目标表面和接触检测点法线之间的交点上的温度代表目标温度。控制节点上的温度代表整个刚性目标面上的温度（如果存在控制节点）。

（4）传导模拟

为了考虑接触面与目标面之间的热交换，用户需要通过一个实常数表来指定热接触传导系数 TCC。用户可以用表格输入把 TCC 定义为接触压力（压力表）、接触检测点温度（温度表）、时间和接触检测点位置（X、Y、Z 表）的函数。为了模拟存在小间隙的两个面之间的接触传导，应用 KEYOPT（12）=4 或 5 来定义“绑定接触”或“不分开接触”选项。

（5）对流模拟

为了模拟对流热交换，用户必须应用 SFE 命令指定热对流系数 CONV。CONV 可以是一常数（只允许均匀的）或是通过表格输入的作为温度、时间、位置的函数。对于自由面对流，用户必须通过 SFE 命令指定体积温度。

（6）辐射模拟

为了模拟辐射热交换，用户必须指定下列条件之一：

1）通过材料特性定义热辐射系数 EMIS。

2）通过实常数定义 Stefan-Boltzman 常数。如果这个值未定义，将不包括辐射效应。

3）偏量温度 TOFFST。如按华氏度或摄氏度来定义数据，必须用 TOFFST 命令指定一个温度偏量值。

4）辐射观察系数 RDVF，通过实常数定义，仅用于近场辐射，默认为 1。它可定义为温度、间隙距离、时间、位置的函数。对于远场辐射，RDVF 设置为 0，并忽略用户指定的值。其他自由表面条件使用用户指定的 RDVF。

5）环境（外界）温度，它仅用于自由辐射，以 KVAL=2 和 CONV 为表格参数，用 SFE 命令输入（这与自由表面对流模拟中的体积温度相同）。

（7）摩擦生热的模拟

为了模拟摩擦耗散能量的热生成，用户应当执行瞬态热-结构耦合分析。如果用户希望的话，可以应用 TIMINT，STRUC，OFF 命令关闭结构自由度上的瞬态效应。但是，必须包括热自由度上的瞬态效应。需要两个实常数：

1）FHTG 是转换成热的摩擦耗散能量（默认为 1.0）。

2）FWGT 是接触面和目标面之间热分布的权重系数（默认为 0.5）。

（8）外部热通量模拟

用户可以通过 SFE 命令给接触单元施加热通量，注意只能施加均匀热通量。热通量不

能施加于目标单元。然而，对于近场接触，外部热通量施加于接触面，将贡献到目标单元。

对于自由热表面，如目标单元的 KEYOPT（3）=1，则外热通量仅施加于接触面。对于一个给定的接触单元，必须指定 CONV 和 HFLUX 二者之一。然而，用户可以定义两个不同的接触对：一个模拟对流，另一个模拟热通量。

5.1.5 非线性分析步骤

尽管非线性分析比线性分析更加复杂，但处理过程基本相同，只是在非线性分析的适当过程中，添加了需要的非线性特性。

非线性静态分析是静态分析的一种特殊形式。如同任何静态分析，处理流程主要由三个主要步骤组成：建模；加载与求解；查看结果。

1．建模

非线性分析的建模过程与线性分析十分相似，只是非线性分析中可能包括特殊的单元或非线性材料性质。如果模型中包含大应变效应，则必须采用真实应力和真实应变数据。

2．加载与求解

此步操作需要定义分析类型和分析选项，指定载荷步选项并开始有限元求解。但是非线性求解经常需要求解多个载荷增量，且总是需要平衡迭代，因此它不同于线性求解。具体处理过程如下：

（1）进入 ANSYS 求解器

Command：/SOLU

GUI：Main Menu | Solution

（2）定义分析类型及分析选项

分析类型和分析选项在第一个载荷步之后不能被改变。表 5-1 是 ANSYS 提供的用于非线性静态分析的选项。

表 5-1 分析类型和分析选项

选　　项	命　令	GUI 途径
Analysis Type：Static	ANTYPE	Main Menu	Solution	Analysis Type	New Analysis Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Restart Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic Main Menu	Solution	Analysis Type	New Analysis Main Menu	Solution	Analysis Type	Restart Main Menu	Solution	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic
Large Deformation Effects	NLGEOM	Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic Main Menu	Solution	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Solution	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic
Prestres Effects Calculation	PSTRES	Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic Main Menu	Solution	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Solution	Analysis Type	Sol'n Controls	Basic
New-Raphson Option	NROPT	Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Solution	Analysis Type	Analysis Options
Equation Solver	EQSOLV	Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Preprocessor	Loads	Analysis Type	Sol'n Controls	Sol'n Options Main Menu	Solution	Analysis Type	Analysis Options Main Menu	Solution	Analysis Type	Sol'n Controls	Sol'n Options



- 分析类型（ANTYPE）：选择 Static（静态）。
- 大变形或大应变选项（NLGEOM）：并不是所有的非线性分析都产生大变形，若产生大变形，选择 ON，若不产生大变形，选择 OFF。
- 应力刚化效应（PSTRES）：如果存在应力刚化效应，则选择 ON。

程序默认值一般为 OFF，但当 NLGEOM 和 SOLCONTROL 打开时，程序默认值为 ON。

注意：在 ANSYS 16.1 中，该命令已被 PSTRES 命令取代。

- Prestres Effects Calculation（PSTRES）：通过此选项可以在同一模型上施加预应力分析，程序默认值为 OFF。

注意：应力刚化选项和预应力计算选项不能同时在分析中使用，如果在同一分析中同时使用了这两个选项，后者将覆盖前者。

- 牛顿-拉普森选项（NROPT）：仅在非线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多长时间修改一次正切矩阵。可以指定下列值中的一个。

➢ 程序选择（NROPT，AUTO）：程序根据模型中存在的非线性种类自动选用这些选项中的一个。在需要时牛顿-拉普森方法将自动激活自适应下降。

➢ 完全牛顿-拉普森选项（NROPT，FULL）：程序使用完全的牛顿-拉普森处理方法，在这种处理方法中每进行一次平衡迭代即修改刚度矩阵一次。如果自适应下降是关闭的，程序每一次平衡迭代都使用正切刚度矩阵。如果自适应下降是打开的（默认设置），只要迭代保持稳定，程序仅使用正切刚度矩阵。如果在某一次迭代过程中检测到发散倾向，程序将抛弃发散的迭代并重新开始求解，此时应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代重新回到收敛模式时，程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对于复杂的非线性问题，自适应下降通常能提高程序获得收敛的能力。

➢ 修正的牛顿-拉普森选项（NROPT，MODI）：程序使用修正的牛顿-拉普森方法，在这种方法中，正切刚度矩阵在每一子步中都被修正，在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析，而且无法使用自适应下降。

➢ 初始刚度（NROPT，INIT）：程序在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵，该选项可以使迭代过程更容易收敛，但需要更多迭代次数来得到收敛。该选项不适用于大变形分析，且自适应下降不可用。

（3）在模型上加载

在大变形分析中，惯性力和点载荷将保持恒定的方向，但表面力将“跟随”结构的变化而改变。

（4）指定载荷步选项

下列选项适用于非线性静态分析。

- 普通选项

➢ Time（TIME）

ANSYS 程序借助在每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步和子步。使用

TIME 命令可以用来定义受某些实际物理量限制的 TIME 值。程序通过这个选项来指定载荷步的末端时间。

提示： *在没有指定 TIME 值时，程序将依据默认设置自动地对每一个载荷步按 1.0 增加 TIME（在第一个载荷步的末端以 TIME=1.0 开始）。*

➢ 时间步的数目（NSUBST）和时间步长（DELTIM）

非线性分析要求在每一个载荷步内有多个子步或时间步，从而 ANSYS 可以逐渐施加所给定的载荷，逐步得到精确解。NSUBST 和 DELTIM 命令具有同样的功效，即给定载荷步的起始、最小及最大步长。NSUBST 定义在一个载荷步内将被使用的子步的数目，而 DELTIM 明确地定义时间步长。如果自动时间步长是关闭的，那么起始子步长用于整个载荷步。默认时是每个载荷步具有一个子步。

➢ 渐进式或阶跃式加载（KBC）

在与应变率无关的材料行为的非线性静态分析中，通常不需要指定这个选项，因为依据惯例，载荷为阶跃式的载荷（KBC，1），而在与应变率相关的材料行为情况下（蠕变或粘塑性），需明确指出加载方式。

➢ 自动时间步长（AUTOTS）

这一选项允许程序自动确定子步间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步（子步）长。默认时是 OFF 状态。可以用 AUTOTS 命令打开自动时间步长和二分法。通过激活自动时间步长，可以使程序决定在每一个载荷步内使用多少个时间步。

● 非线性选项

➢ 收敛准则（CNVTOL）

默认的收敛准则：依据惯例，程序将以 VALUE×TOLER 的值对力（或者力矩）进行收敛检查。VALUE 的默认值是在所加载荷或所加位移中取值较大者。TOLER 的默认值是 0.001。

提示： *如果明确地定义了任何收敛准则（CNVTOL），默认准则将“失效”。因此，如果定义了位移收敛准则，则需要再定义力收敛准则（使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则）。*

用户自定义收敛准则：ANSYS 允许用户定义收敛准则，替代默认的值。使用严格的用户自定义收敛准则将提高求解结果的精度，但以更多次的平衡迭代为代价。要改变收敛准则，需要对 TOLER 进行两个数量级的改变。一般通过调整 TOLER 而不是 VALUE 来改变收敛准则。

在单一和多 DOF 系统中检查收敛：要在单自由度（DOF）系统中检查收敛，需要对单一 DOF 计算出不平衡力，然后对照给定的收敛准则（VALUE×TOLER）进行检测。

➢ 最大平衡迭代次数（NEQIT）

使用这个选项来对在每一个子步中进行的最大平衡迭代次数实行限制（默认为 25）。如果在这个平衡迭代次数之内不能满足收敛准则，而且自动步长是打开的，程序将尝试使用二分法。如果无法使用二分法，程序将根据 NCNV 命令所发出的指示终止分析过程，或者进行下一个载荷步。

➢ 求解终止选项（NCNV）

这个选项具有 5 种不同类型的终止准则：如果位移“太大”，它建立一个用于终止程序执行的准则；对累积迭代次数设置限制；对整个程序运行时间设置限制；对整个 CPU 时间设置限制；如果平衡迭代收敛，则控制程序是否终止执行。

➢ 弧长法（ARCLEN）

如果预料到结构在其加载过程中，在某些点会出现物理意义上的不稳定（结构的载荷-位移曲线的斜度为 0 或负值），则可以使用弧长法来稳定数值求解。

提示：不应和弧长法一起使用下列选项：线搜索（LNSRCH）、时间步长预测（PRED）、自适应下降（NROPT，，，ON）、自动时间步长（AUTOTS，TIME，DELTIM）、时间-积分效应（TIMINT）。

➢ 时间步长预测（PRED）

对于每一个子步的第一次平衡迭代，可以激活和 DOF 求解有关的预测。其特点是加速收敛。如果非线性响应是相对平滑的，进行时间步长预测将非常有用。该选项不适用于包含大转动或粘弹效应的分析。

➢ 线搜索选项（LNSRCH）

该选项可替代自适应下降选项。如果线搜索选项是打开的，程序将自动关闭自适应下降选项。

➢ 蠕变准则（CRPLIM，CRCR）

如果结构表现出蠕变行为，可以指定蠕变准则用于自动时间步调整。此时程序将对所有单元计算蠕变应变增量对弹性应变的比值。如果最大比值比判据大，程序将减小下一个时间步长；如果小，程序将增加下一个时间步长（程序将把自动时间步长建立在平衡迭代次数、即将发生的单元状态改变以及塑性应变增量的基础上）。如果比值高于 0.25 的稳定界限，且时间增量不能被减小，求解过程可能由于发散而终止。该问题可以通过采用足够小的时间步长来避免。

提示：如果自动时间步长（AUTOTS）是关闭的，蠕变准则将无效。

➢ 激活和“杀死”选项（EKILL、EALIVE）

在 ANSYS/Mechanical 和 ANSYS/LS-DYNA 产品中，可以采用“杀死”和激活单元来模拟材料的消去和添加。

程序可以通过用一个非常小的数（它由 ESTIF 命令设置）乘以它的刚度，从而从总质量矩阵中消去它的质量来“杀死”一个单元。对于无活性单元的单元载荷（压力、热通量、热应变等），同样需要被设置为零。注意，要在前处理中定义所有可能的单元，不能在 SOLUTION 中产生新的单元。

在分析的后面阶段中“出生”的单元，在第一个载荷步前应当被“杀死”，然后在适当的载荷步开始前被重新激活，当单元被重新激活时，它们具有零应变状态，而且它们的几何（开头长度、面积等）形状将被修改以便与它们的现偏移位置相适应。

● 输出控制选项

➢ 打印输出（OUTPR）

使用该选项使输出文件（Jobname.out）包含想要的结果数据。

➢ 结果文件输出（OUTRES）

该选项用于控制结果文件中的数据（Jobname.rst）。

➢ 结果外推（ERESX）

该选项的功能是复制一个单元的积分点应力和弹性应变结果到节点而替代外推它们。如果在单元中存在非线性（塑性、蠕变、膨胀），积分点的非线性变化总是被复制到节点。

（5）存储文件

Command：SAVE

GUI：Utility Menu｜File｜Save As

（6）开始求解计算

Command：SOLVE

GUI：Main Menn｜Solution｜Solve｜Current LS

（7）退出求解器

Command：FINISH

GUI：Main Menu｜Finish

3．查看求解结果

非线性静态分析的结果主要包括：位移、应力、应变和反作用力。可以用 POST1（通用后处理器）或 POST26（时间历程后处理器）来考查这些结果。

提示：POST1 后处理器主要用于考查所有节点在某一时刻的求解结果，而 POST26 后处理器主要用于考查某个节点在所有时间的求解结果。

（1）用 POST1 考查结果

● 进入 POST1

Command：POST1

GUI：Main Menu｜General Postproc

● 读取载荷步结果

Command：SET

GUI：Main Menn｜General Postproc｜Read Results

● 显示结果

➢ 显示变形形状

Command：PLDISP

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Deformed Shapes

➢ 等值线显示

Command：PLNSOL、PLESOL

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu GUI：Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Element Solu

使用以下命令绘制单元表数据和线单元数据的等值线：

Command：PLETAB、PLLS

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Element Table｜Plot Element Table
GUI：Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Line Elem Res
➢ 列表显示
Command：PRNSOL、PRESOL、PRRSOL、PRETAB、PRITER、NSORT、ESORT
GUI：Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Nodal Solution
GUI：Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Element Solution
GUI：Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Reaction Solution
可使用 NSORT 和 ESORT 命令对数据列表进行排序。
（2）用 POST26 考查结果
● 进入 POST26
Command：POST26
GUI：Main Menu｜Time Hist Postpro
● 定义变量
Command：NSOL、ESOL、RFORCL
GUI：Main Menu｜Time Hist Postproc｜Define Variables
● 图形或者列表显示变量
Command：PLVAR、PRVAR、EXTREM
GUI：Main Menu｜Time Hist Postprac｜Graph Variable S
GUI：Main Menu｜Time Hist Postproc｜List Variables
GUI：Main Menu｜Time Hist Postproc｜List Extremes

5.2 几何非线性实例详解——圆柱壳体受力分析

5.2.1 问题描述

图 5-21 所示为一个对边简支的圆柱壳体，在其中心承受垂直集中载荷 F 的作用，求 A、O 两点的垂直位移。

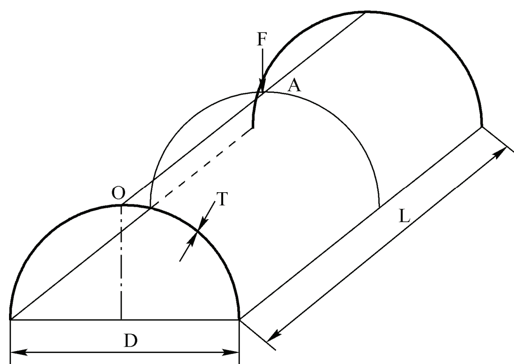


图 5-21 壳体结构示意图

壳体几何参数：L=2400mm；D=1000mm；T=2mm

壳体材料参数：弹性模量 E=69GPa；泊松比ν=0.3

载荷：F=6000N

5.2.2 问题分析

该问题属于壳体的非线性屈曲问题。根据对称性，选择壳体的 1/4 建立几何模型，施加集中力载荷为 F/4，并选择 SHELL181 壳单元进行分析求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SHELL63 壳单元。

5.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 CYLINDRICAL SHELL SUBJECTED TO A CONCENTRATED FORCE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell 3D 4node 181，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-22 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

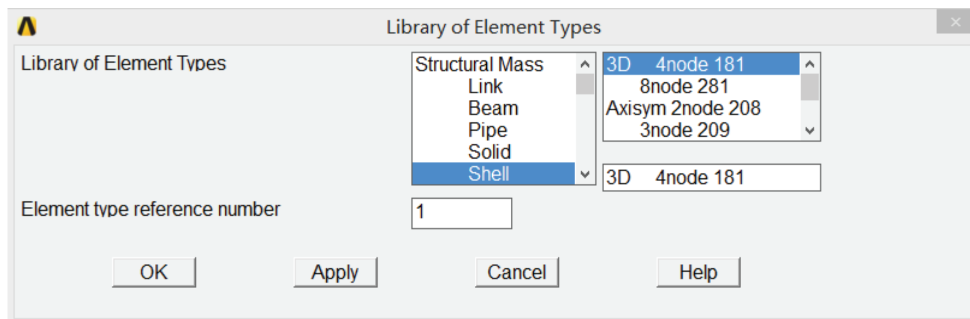


图 5-22 单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Option 按钮，出现 SHELL181 element type options 对话框，在 Integration option K3 下拉菜单中选择 Full w/ incompatible，如图 5-23 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

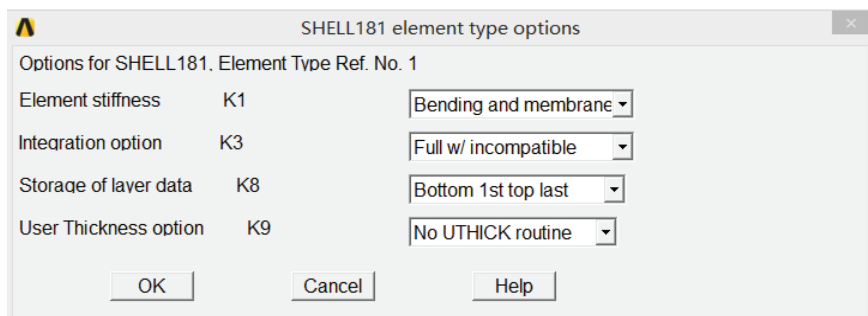


图 5-23　SHELL181 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 6.9E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框，在 Thickness 输入栏中输入 0.002，其余选项采用默认设置，如图 5-24 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

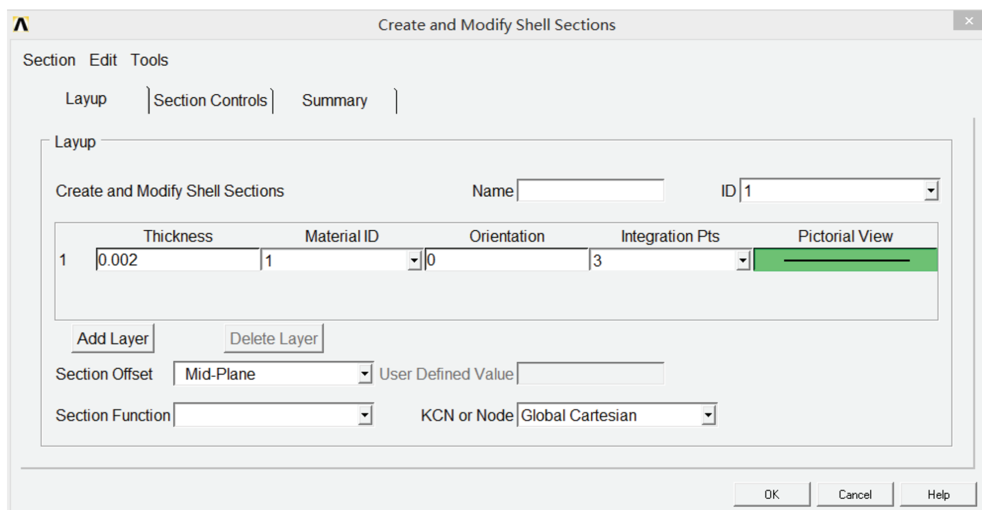


图 5-24　定义壳单元横截面对话框

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当

前坐标系转变为柱坐标系。

注意：以下的操作将在柱坐标系中进行。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

3）在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0.5、0、0，如图 5-25 所示。

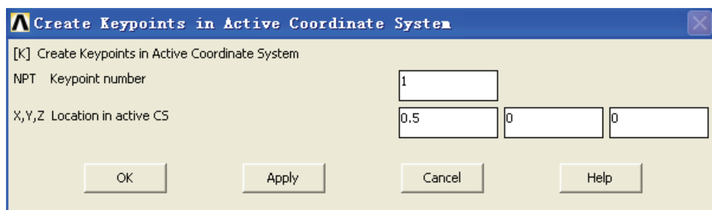


图 5-25　生成关键点对话框

4）单击 Apply 按钮，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0.5、0、1.2；单击 Apply 按钮；在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 3，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0.5、90、0；单击 Apply 按钮；在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入 4，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0.5、90、1.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，参照图 5-26 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

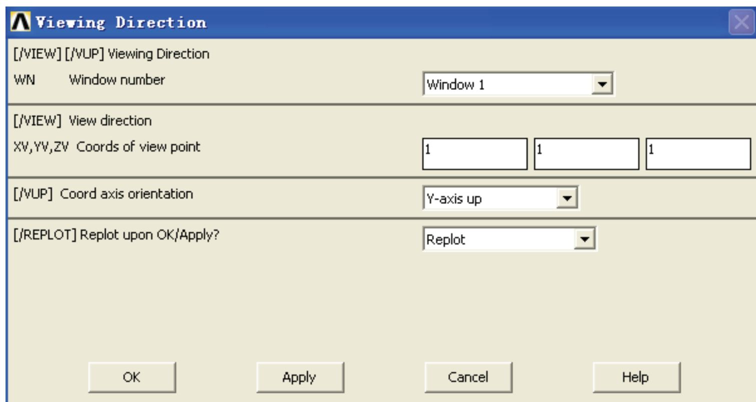


图 5-26　视图显示方向设置对话框

技巧：可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

6）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP　Keypoint numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点编号。

7）选择 Utility Menu | Plot | Keypoints | Keypoints 命令，显示所有关键点。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs 命令，出现 Create Area thru 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，4，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

注意：通过关键点创建面，需按照次序拾取关键点。

9）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 5-27 所示的几何模型。

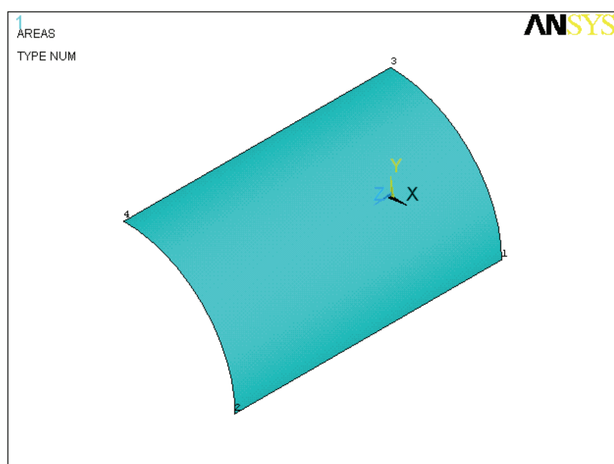


图 5-27　生成的几何模型结果显示

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L1、L3 划分为 20 等份。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 12，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

13）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 5-28 所示。

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。



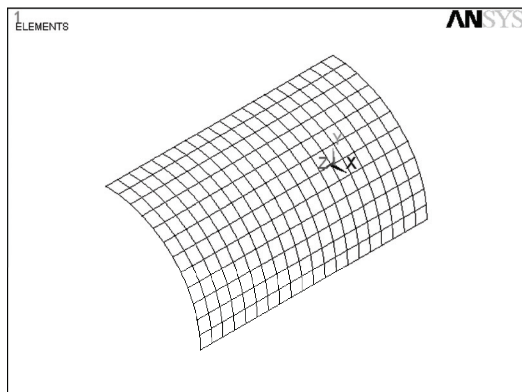


图 5-28　网格划分结果显示

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Z 坐标为 0 的所有节点。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 Z-axis，在 KCN Coordinate system no.输入栏中输入 0，如图 5-29 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

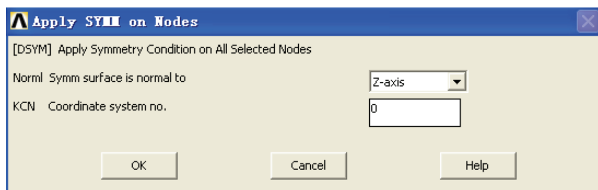


图 5-29　施加对称位移约束对话框

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 90，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择θ坐标为 90°的所有节点，即 Y 轴上的节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 X-axis，在 KCN Coordinate system no.输入栏中输入 0，

单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择θ坐标为 0°的所有节点，即 X 轴上的节点。

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，参照图 5-30 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Keypoints 命令，出现 Apply F/M on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on KPs 对话框，参照图 5-31 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

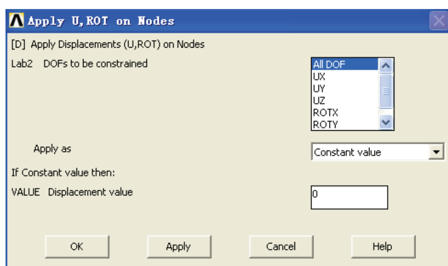


图 5-30 施加位移约束对话框

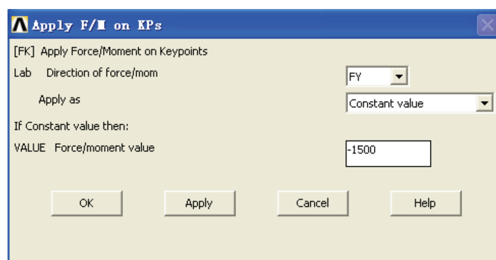


图 5-31 在关键点上施加集中力载荷对话框

10）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-32 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

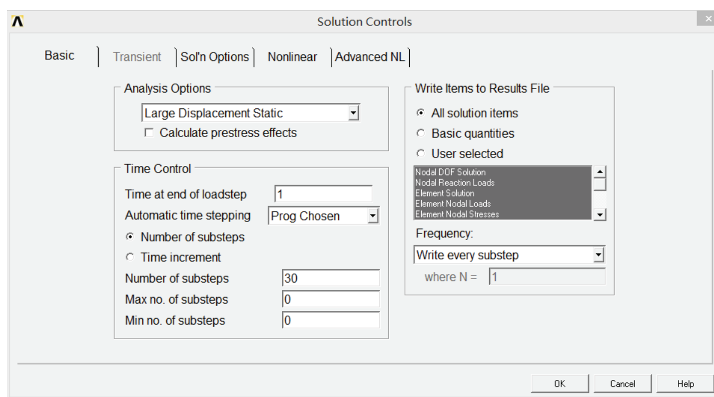


图 5-32 求解控制基本选项设置对话框

11）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save

Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+ undeformed 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形和未变形的形状，如图 5-33 所示。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-34 所示的 Y 方向位移等值线图。

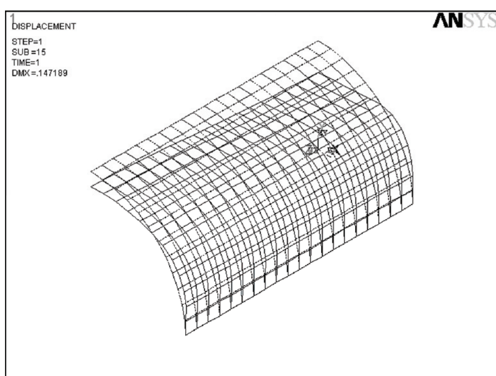


图 5-33 变形后的几何形状和未变形轮廓显示

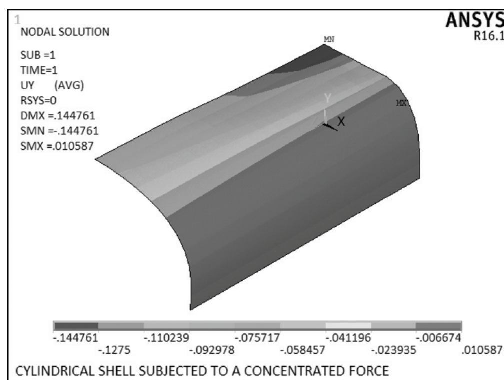


图 5-34 Y 方向位移等值线图

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-35 所示的合位移等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-36 所示的等效应力等值线图。

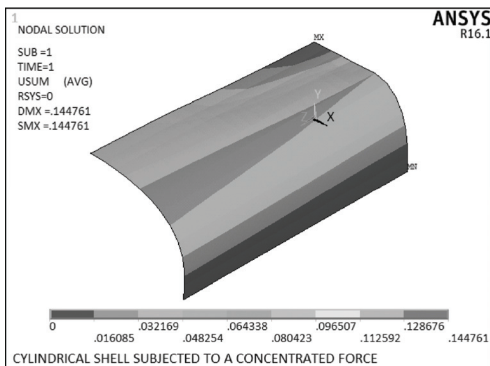


图 5-35 合位移等值线图

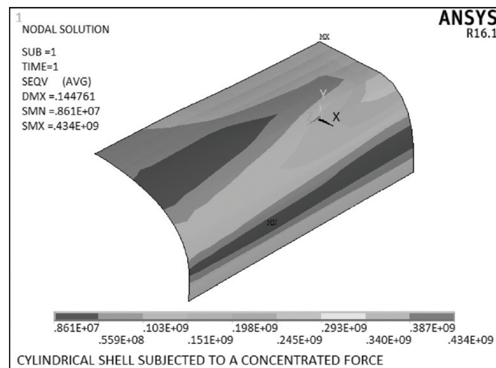


图 5-36 等效应力等值线图

5）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为直角坐标系。

注意：以下的操作将在直角坐标系中进行。

6）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 NODE1=NODE（0，0.5，1.2），单击 Accept 按钮；重新输入 NODE2=NODE（0，0.5，0），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：将坐标值为（0，0.5，1.2）和（0，0.5，0）的节点编号分别输入给变量 NODE1 和 NODE2。

7）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NODE1，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 5-37 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

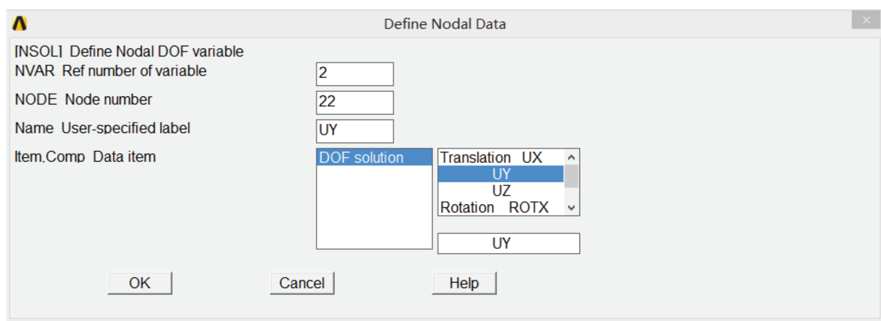


图 5-37 定义节点变量对话框

提示：将节点 NODE1 沿 Y 方向的位移定义为变量 2。

8）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选择 Nodal DOF result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NODE2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UY，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将节点 NODE2 沿 Y 方向的位移定义为变量 3。

9）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Math Operations | Multiply 命令，出现 Multiply Time-History Variables 对话框，在 IR Reference number for result 输入栏中输入 4，在 FACTA 1st Factor 输入栏中输入 6000，在 IA 1st Variable 输入栏输入 1，在 Name User-specified label 输入栏中输入 LOAD，其余选项采用默认设置，如图 5-38 所示，单击 Apply

按钮；在 IR　Reference number for result 输入栏中输入 5，在 FACTA　1st Factor 输入栏中输入-1，在 IA　1st Variable 输入栏中输入 2；单击 Apply 按钮；在 IR　Reference number for result 输入栏中输入 6，在 FACTA　1st Factor 输入栏中输入-1，在 IA　1st Variable 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

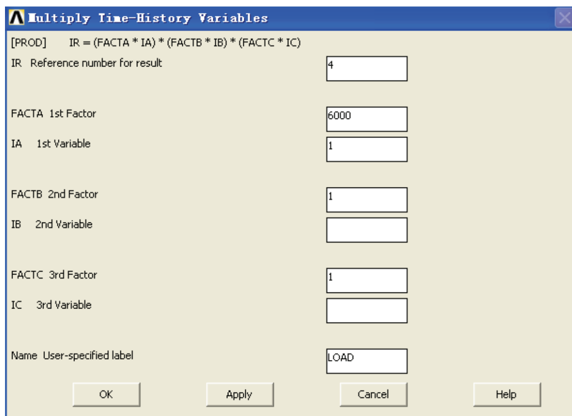


图 5-38　数乘时间-历程变量对话框

提示：此操作将为以后载荷、位移之间的关系提供正确的显示结果。

11）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，参照图 5-39 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

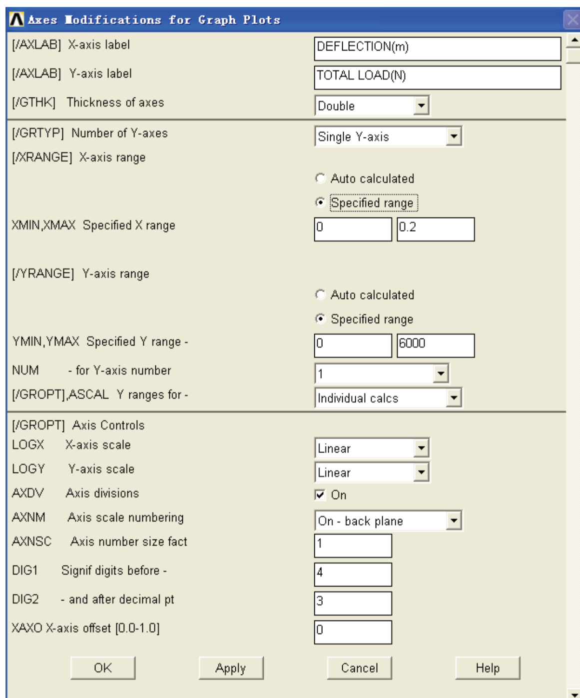


图 5-39　坐标轴设置对话框

12）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Setting | Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，参照图 5-40 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

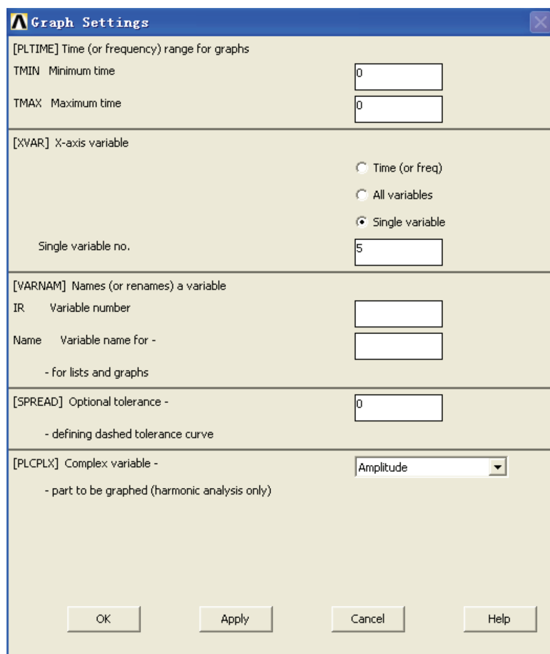


图 5-40　曲线设置对话框

13）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 O 点的垂直位移和载荷的变化关系曲线，如图 5-41 所示。

14）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Setting | Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在[XVAR] X-axis variable 选项中选择 Single variable，在 Single variable no.输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 A 点的垂直位移和载荷的变化关系曲线，如图 5-42 所示。

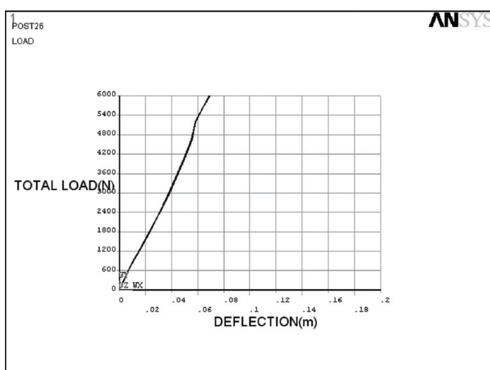


图 5-41　O 点垂直位移和载荷的变化关系曲线

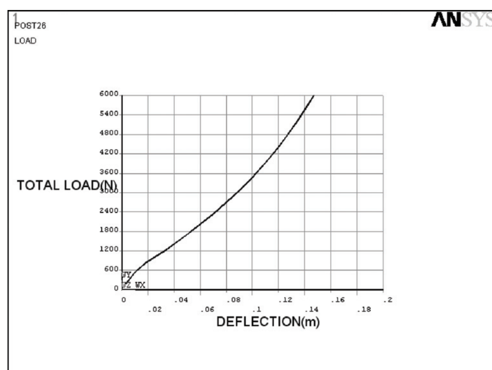


图 5-42　A 点垂直位移和载荷的变化关系曲线

16）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

✍ **试一试**：本例也可以选择整个圆柱壳体建立几何模型，但此时的载荷和边界条件有所变化，求解结果应和本例的求解结果一致，读者可试解之。

5.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                             ！定义工作文件名
/TITLE，CYLINDRICAL SHELL SUBJECTED TO A CONCENTRATED FORCE
                                                ！定义工作标题
/PREP7                                          ！进入前处理器
ET，1，SHELL181                                 ！选择单元类型
KEYOPT，1，3，2                                 ！定义单元关键字
MP，EX，1，6.9E10                               ！输入材料弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                                ！输入材料泊松比
SECTYPE，，SHELL
SECDATA，2E-3                                   ！定义圆筒壁厚


CSYS，1                                         ！将当前坐标系转变为柱坐标系
K，1，0.5，0，0                                 ！生成关键点
K，2，0.5，0，1.2
K，3，0.5，90，0
K，4，0.5，90，1.2
/VIEW，1，1，1，1                               ！设置视图显示方向
/PNUM，KP，1                                    ！显示关键点编号
A，1，2，4，3                                   ！由关键点生成面
APLOT                                           ！显示面
/PNUM，LINE，1                                  ！显示线段编号
LPLOT                                           ！显示线段
LSEL，S，，，1，3，2                            ！选择线段
LESIZE，ALL，，，20                             ！设置线段等分数
LSEL，S，，，2，4，2
LESIZE，ALL，，，12
ALLSEL                                          ！选择所有实体
AMESH，ALL                                      ！对面进行网格划分
EPLOT                                           ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                           ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                  ！指定求解类型
NSEL，S，LOC，Z，0                              ！选择节点
DSYM，SYMM，Z                                   ！施加对称位移约束
NSEL，S，LOC，Y，90
DSYM，SYMM，X
NSEL，S，LOC，Y，0
D，ALL，ALL                                     ！施加位移约束
ALLSEL
```

```
FK，3，FY，-1500                        ！施加集中力载荷
NLGEOM，ON                              ！启动大应变选项
TIME，1                                 ！定义计算终止时间
OUTRES，，1                             ！存储求解结果选项设置
NSUBST，30                              ！定义迭代子步数
SOLVE                                   ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                  ！进入 POST1 后处理器
PLDISP，1                               ！显示变形和未变形形状
PLNSOL，U，Y                            ！绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，SUM                          ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，EQV                          ！绘制等效应力场等值线图
FINISH

/POST26                                 ！进入 POST26 后处理器
CSYS，0                                 ！将当前坐标系转变为直角坐标系
NODE1=NODE(0，0.5，1.2)                 ！根据节点坐标获取节点编号
NODE2=NODE(0，0.5，0)
NSOL，2，NODE1，U，Y                    ！定义节点变量
NSOL，3，NODE2，U，Y
PROD，4，1，，，LOAD，，，6000          ！变量相乘
PROD，5，2，，，，，，-1                ！改变变量符号
PROD，6，3，，，，，，-1
/AXLAB，X，DEFLECTION(m)                ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，TOTAL LOAD(N)                ！指定 Y 坐标轴标题
/GRID，1                                ！网格显示设置
/XRANGE，0，0.2                         ！X 坐标轴显示范围设置
/YRANGE，0，6000                        ！Y 坐标轴显示范围设置
XVAR，5                                 ！X 坐标轴变量设置
PLVAR，4                                ！变量关系图解显示
XVAR，6
PLVAR，4
FINISH
/EXIT，ALL                              ！退出 ANSYS
```

5.3 几何非线性实例详解——细长杆屈曲分析

5.3.1 问题描述

图 5-43 所示为一根横截面为正方形的细长杆，一端固定，另一端受集中力 F 的作用，求细长杆变形后的形状及 A 点的位移。

长杆几何参数：L=1200mm；B=6mm；H=6mm

长杆材料参数：弹性模量 E=85GPa；泊松比ν=0.3

载荷：F=20N、25N、30N

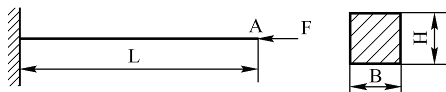


图 5-43　细长杆受力示意图

5.3.2 问题分析

首先计算其临界屈曲载荷：$F_0=\pi^2EI/(4L^2)=15.71N$，所承受的载荷大于其临界屈曲载荷，因此该问题属于细长杆的非线性屈曲问题。选择细长杆为研究对象，建立几何模型，并选择BEAM188 梁单元进行求解。

注意：ANSYS 16.1 版本，已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的BEAM23 梁单元。

5.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new Jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 BEAM SUBJECTED TO CONCENTRATED FORCE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 B=0.006，单击 Accept 按钮；输入 H=0.006，单击 Accept 按钮；输入 L=1.2，单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Beam 2 node 188，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-44 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

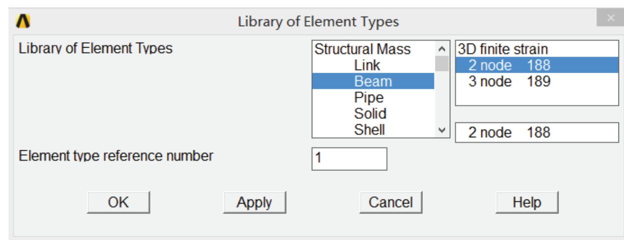


图 5-44　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 8.5E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Beam | Common Sections 命令，出现 Beam Tool 对话框，在 Sub-Type 下拉选框中选择矩形梁标记，在 B、H 输入栏中分别输入 0.006、0.006，如图 5-45 所示。单击 Preview 按钮，ANSYS 显示窗口将显示矩形梁的相关信息，如图 5-46 所示，单击 Beam Tool 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

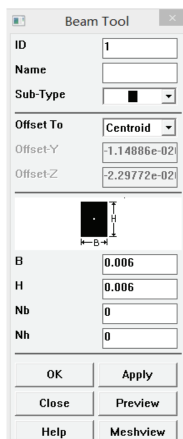


图 5-45　输入矩形梁特征参数对话框

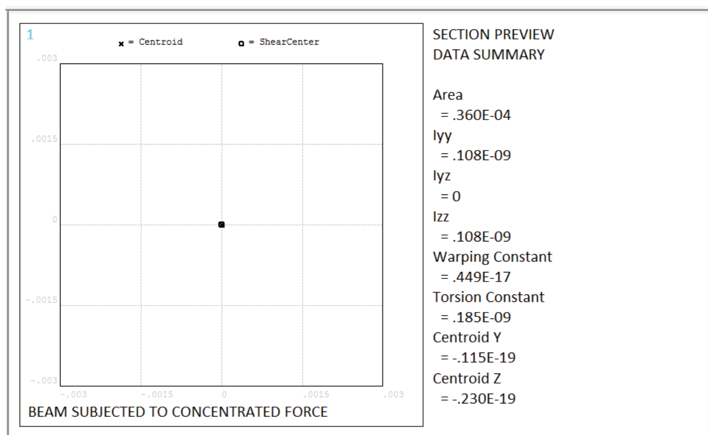


图 5-46　矩形梁信息显示对话框

4．创建有限元模型

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 NODE　Node numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示节点编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 的 3 个输入栏中分别输入 0、0、0，如图 5-47 所示。单击 Apply 按钮，在 NODE　Node number 输入栏中输入 11，在 X,Y,Z　Location in active CS 的 3 个输入栏中分别输入 L、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

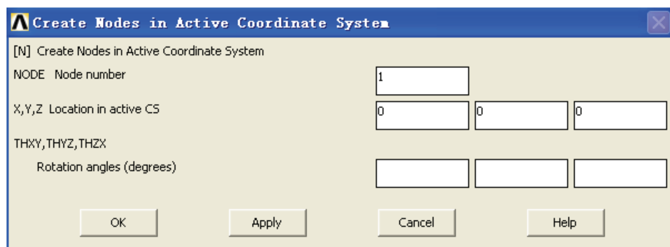


图 5-47　生成节点对话框

提示：采用直接建模的方法，首先创建节点。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between Nds 命令，出现 Fill between Nds 拾取菜单，在输入栏中输入 1，11，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，参考图 5-48 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：通过节点创建单元。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，参照图 5-49 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

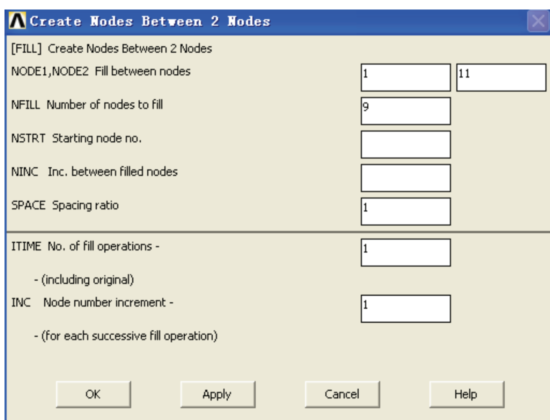


图 5-48 在两节点间生成节点对话框

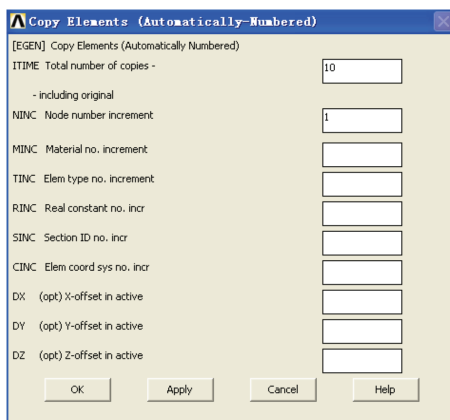


图 5-49 单元复制选项设置对话框

6）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 5-50 所示。

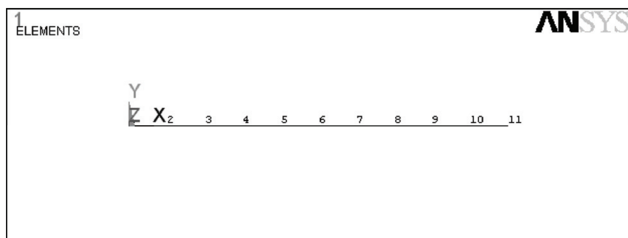


图 5-50 生成的有限元模型显示

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 5-51 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

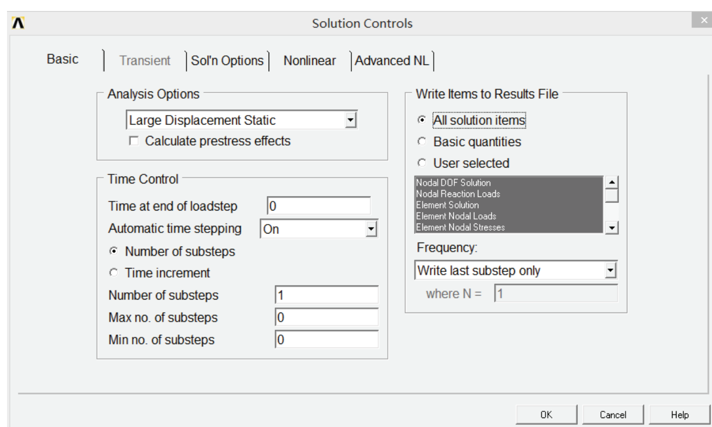


图 5-51　求解控制基本选项设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，参照图 5-52 对其进行设置，单击 Apply 按钮，在 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单的输入栏中输入 All，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 选项框中选择 UZ、ROTX、ROTY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对节点 1 施加全位移约束；对所有节点施加 UZ、ROTX、ROTY 的位移约束。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，参照图 5-53 对其进行设置。

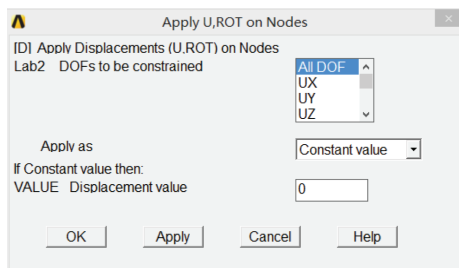


图 5-52　施加位移约束对话框

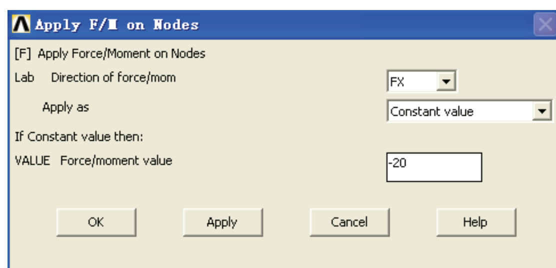


图 5-53　施加集中力载荷对话框

5）单击 Apply 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mon 下拉菜单中选择

FY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加集中力载荷。

6）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示施加载荷及约束后的结果，如图 5-54 所示。

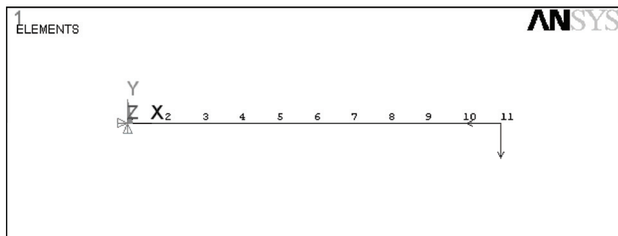


图 5-54　施加载荷及约束后的结果显示

7）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将求解设置写入到载荷步文件。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Direction of force/mon 下拉菜单中选择 FY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-0.1。

9）单击 Apply 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Direction of force/mon 下拉菜单中选择 FX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-25，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Direction of force/mon 下拉菜单中选择 FY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-0.1。

12）单击 Apply 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 11，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab　Direction of force/mon 下拉菜单中选择 FX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入-30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load

Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Solution | Solve | From LS Files 命令，出现 Solve Load Step Files 对话框，在 LSMIN Starting LS file number 输入栏中输入 1，在 LSMAX Ending LS file number 输入栏中输入 3，在 LSINC File number increment 输入栏中输入 1，如图 5-55 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。ANSYS 开始求解计算。

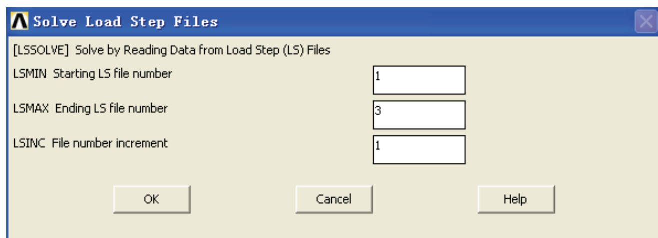


图 5-55 按载荷步文件进行求解对话框

15）求解完毕之后，出现 Note 提示框，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存求解结果。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | First Set 命令，读取第 1 个载荷步的求解结果。

提示：若要查看光盘中的计算结果，需先执行 Main Menu | General Postproc | Data & File Opts 命令，出现 Data and File Options 对话框后，在 Results file to be read 选项中选择光盘目录下的 EXERCISE2.rst 结果文件。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 20N 时杆件的变形形状，如图 5-56 所示。

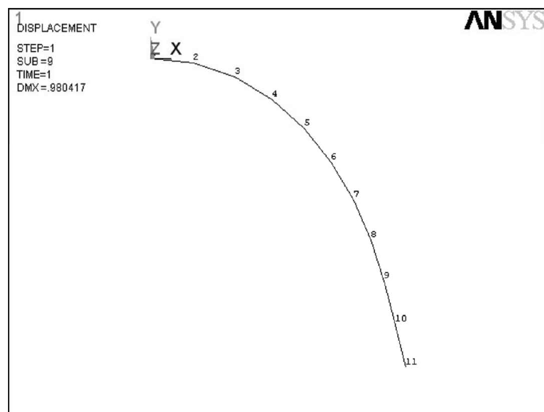
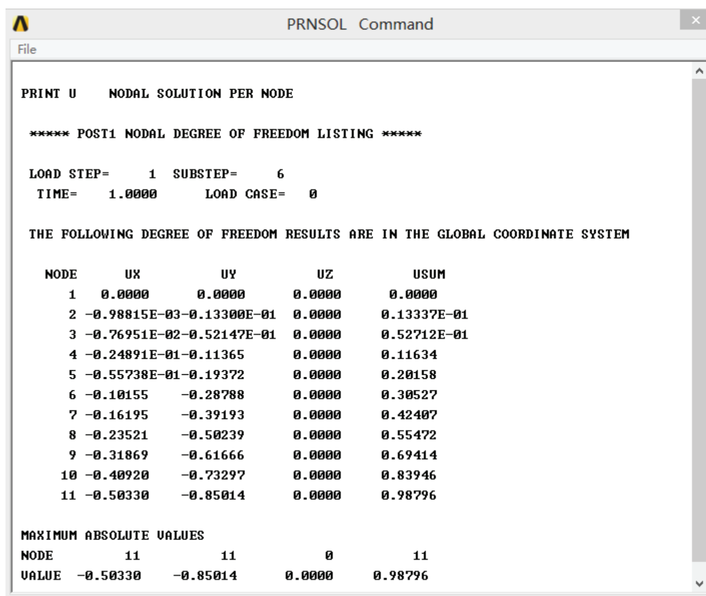


图 5-56 施加 20N 载荷时的变形形状

3）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 20N 时的节点位移，如图 5-57 所示。



```
PRNSOL  Command
File

PRINT U    NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     6
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

   NODE      UX          UY          UZ          USUM
      1   0.0000      0.0000      0.0000      0.0000
      2 -0.98815E-03-0.13300E-01  0.0000     0.13337E-01
      3 -0.76951E-02-0.52147E-01  0.0000     0.52712E-01
      4 -0.24891E-01-0.11365      0.0000     0.11634
      5 -0.55738E-01-0.19372      0.0000     0.20158
      6 -0.10155    -0.28788      0.0000     0.30527
      7 -0.16195    -0.39193      0.0000     0.42407
      8 -0.23521    -0.50239      0.0000     0.55472
      9 -0.31869    -0.61666      0.0000     0.69414
     10 -0.40920    -0.73297      0.0000     0.83946
     11 -0.50330    -0.85014      0.0000     0.98796

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE         11          11           0          11
VALUE  -0.50330    -0.85014      0.0000     0.98796
```

图 5-57　施加 20N 载荷时的节点位移

4）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Next Set 命令，读取第 2 个载荷步的求解结果。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND　Items to be plotted 选项中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 25N 时杆件的变形形状，如图 5-58 所示。

6）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 25N 时的节点位移。

7）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取第 3 个载荷步的求解结果。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND　Items to be plotted 选项中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 30N 时杆件的变形形状，如图 5-59 所示。

9）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，ANSYS 显示窗口将显示载荷为 30N 时的节点位移。

10）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

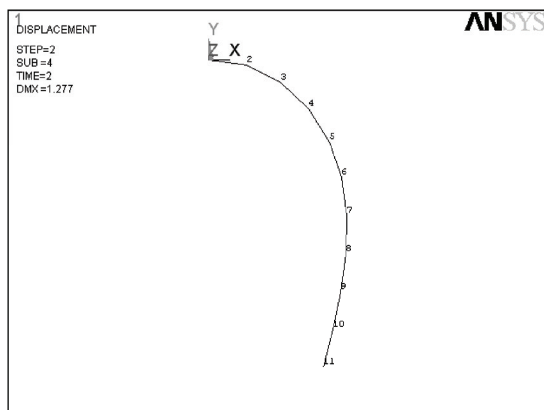


图 5-58　施加 25N 载荷时的变形形状

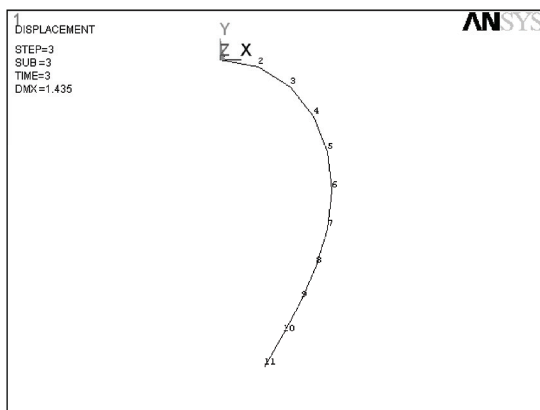


图 5-59　施加 30N 载荷时的变形形状

试一试： 将细长杆的横截面形状改变为直径为 6mm 的圆面，其余参数不变，依据本例的求解思路对该问题进行分析求解。

5.3.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE2                          ！定义工作文件名
/TITLE，BEAM SUBJECTED TO CONCENTRATED FORCE
                                             ！定义工作标题
/PREP7                                       ！进入前处理器
B=0.006                                      ！输入参量
H=0.006
L=1.2
ET，1，BEAM188                               ！定义单元类型
KEYOPT，1，3，3                              ！定义单元关键字
MP，EX，1，8.5E10                            ！输入材料弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                             ！输入材料泊松比
SECTYPE，1，BEAM，RECT
SECDATA，B，H
                                             ！输入工字梁横截面信息
/PNUM，NODE，1                               ！显示节点编号
N，1                                         ！创建节点
N，11，L
FILL，1，11，9
E，1，2                                      ！生成单元
EGEN，10，1，1                               ！复制单元
EPLOT                                        ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                        ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                               ！指定求解类型
NLGEOM，ON                                   ！启动大应变选项
```

```
AUTOTS，ON                                   ！打开自动时间步长
D，1，ALL                                    ！施加位移约束
D，ALL，UZ，，，，，ROTX，ROTY
F，11，FX，-20                               ！施加集中力载荷
F，11，FY，-0.1
LSWRITE，1                                   ！写入载荷步文件
F，11，FY，-0.1                              ！删除集中力载荷
F，11，FX， -25
LSWRITE，2
F，11，FY，-0.1
F，11，FX，-30
LSWRITE，3
LSSOLVE，1，3，1                             ！按载荷步文件求解
SAVE
FINISH

/POST1                                       ！进入 POST1 后处理器
SET，1                                       ！读取第 1 步求解结果
PLDISP，0                                    ！显示变形几何形状
PRNSOL，U                                    ！列表显示节点位移
SET，2                                       ！读取第 2 步求解结果
PLDISP，0
PRNSOL，U
SET，3                                       ！读取第 3 步求解结果
PLDISP，0
PRNSOL，U
FINISH
/EXIT，ALL                                   ！退出 ANSYS
```

5.4 几何非线性实例详解——金属圆盘弹塑性分析

5.4.1 问题描述

图 5-60 所示为一个周边简支的金属圆盘受均布压力 P 和周期载荷 F 的作用，求圆盘在该作用力下的响应（图 5-61 为圆盘纵截面示意图）。

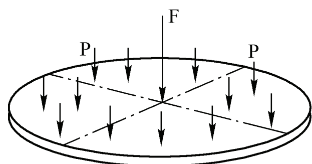


图 5-60 圆盘受力示意图

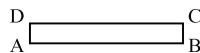


图 5-61 圆盘纵截面示意图

圆盘几何参数：半径 R=300mm；厚度 t=20mm

圆盘材料参数：弹性模量 E=120GPa；泊松比ν=0.3

材料应力、应变关系见表 5-2；压力 P=10MPa，集中力载荷-时间曲线如图 5-62 所示。

表 5-2 材料应力、应变关系表

应力/ MPa	132	189	221	270	294
应变	0.0011	0.0018	0.0026	0.0045	0.0098

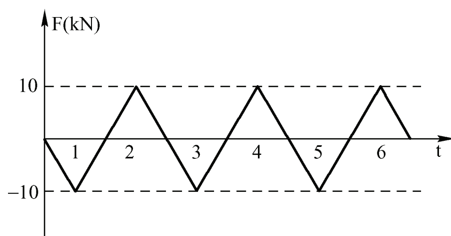


图 5-62 载荷-时间曲线图

5.4.2 问题分析

根据轴对称性，选取如图 5-61 所示的圆盘纵截面的 1/2 建立几何模型，求解过程分为 7 个载荷步，分别用来模拟静载荷的作用和周期载荷的 6 个时间段。采用 PLANE183 单元进行建模求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE82 结构单元。

5.4.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 CYCLIC LOADING OF A FIXED CIRCULAR PLATE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-63 所示。

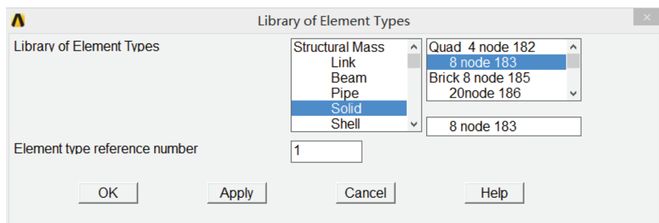


图 5-63 单元类型列表对话框

2）单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Contact　nd-to-nd 178，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Element Types 对话框选中 Type 1 Plane183，单击 Options 按钮，出现 PLANE183 element type options 对话框，在 Element behavior　K3 下拉选框中选择 Axisymmetric，其余选项采用默认设置，如图 5-64 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

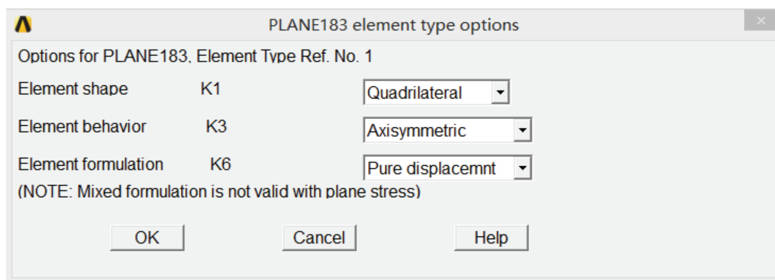


图 5-64　PLANE183 单元属性设置对话框

提示：将单元属性设置为轴对称。

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］　X-axis label 输入栏中输入 LOG STRAIN，在［/AXLAB］　Y-axis label 输入栏中输入 TRUE STRESS（MPa），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置曲线图的坐标轴标题。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

3）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structral、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框。

4）在 EX 输入栏中输入 1.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Availabley 一栏中依次单击 Structral、Nonlinear、Inelastic、Rate Independent、Kinematic Hardening Plasticity、Mises Plasticity、Multilinear（General）选项，出现 Multilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框，参照图 5-65 对其进行输入，单击 Graph 按钮，ANSYS 将在其显示窗口绘制应力、应变关系曲线图，如图 5-66 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：可单击菜单上的 Add Point 按钮增添数据。

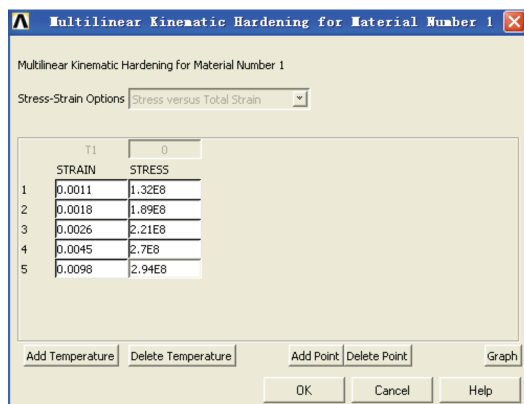


图 5-65　输入多线性随动硬化数据对话框

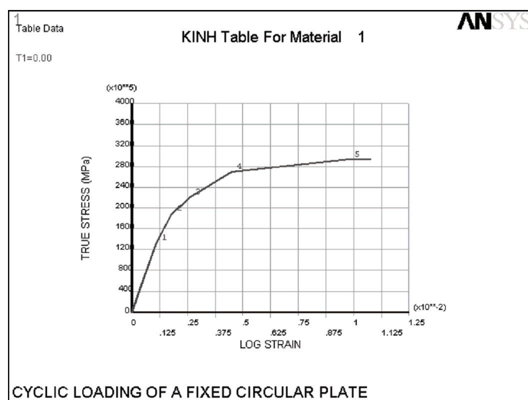


图 5-66　应力、应变关系曲线图

6）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令关闭该对话框。

4．生成几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-Coordinates 输入栏中分别输入 0、0.3，在 Y1,Y2　Y-Coordinates 输入栏中分别输入 0、0.02，如图 5-67 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

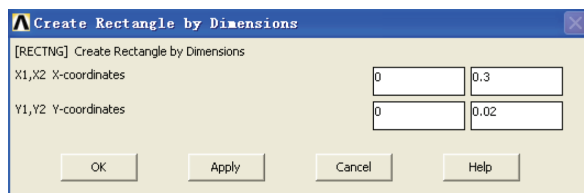


图 5-67　生成矩形面对话框

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L1、L3 划分为 30 等份。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 6，单

击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

6）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 5-68 所示。

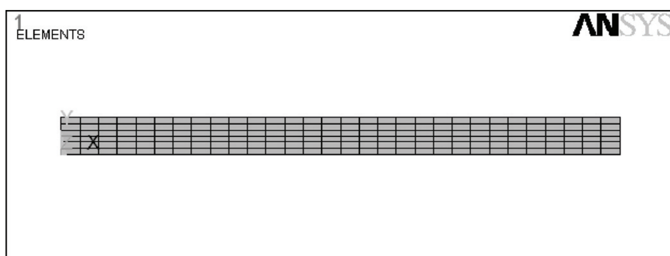


图 5-68　网格划分结果显示

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 5-69 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

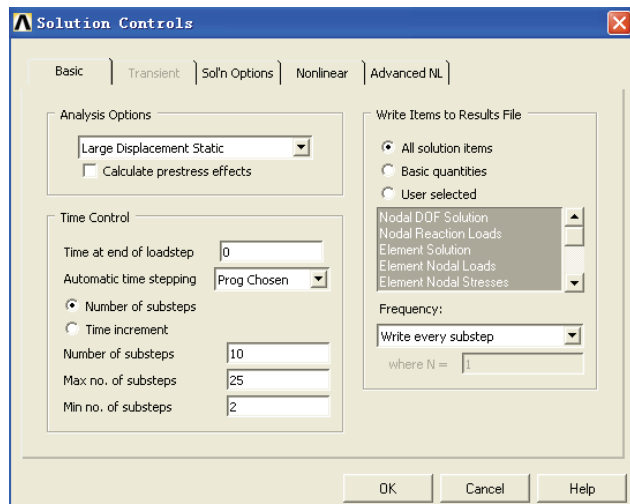


图 5-69　求解控制基本选项设置对话框

3）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 NTOP=NODE（0，0.02，0），单击 Accept 按钮；输入 NRIGHT=NODE（0.3，0，0），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：将坐标为（0，0.02，0）和（0.3，0，0）节点的编号分别输入给变量 NTOP 和 NRIGHT。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.3，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 0.3 的所有节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，参照图 5-70 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

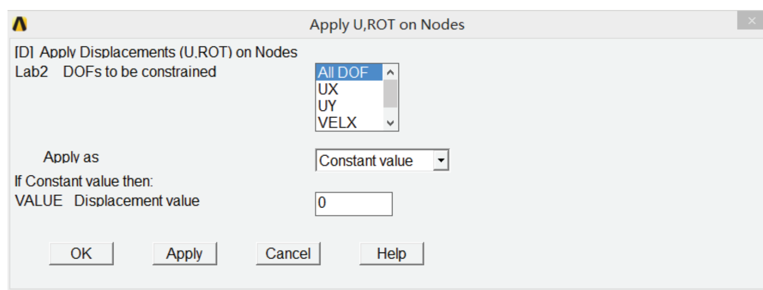


图 5-70 在节点上施加位移约束对话框

提示：对所选节点施加位移约束。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 0 的所有节点。

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加 X 方向的位移约束。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.02，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标值为 0.02 的所有节点。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，参照图 5-71 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

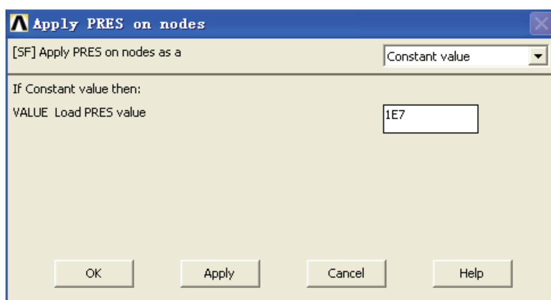


图 5-71 施加压力载荷对话框

提示：对所选节点施加压力载荷。

10）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

11）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将下面的求解过程设置写入到第 1 个载荷步文件里。

12）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 F=1E4，单击 Accept 按钮后再单击 Close 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉菜单中选择 FY，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入-F，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在节点 NTOP 上施加 Y 方向的集中力载荷。

14）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，在 Analysis Options 下拉菜单中选择 Large Displacement Static，在 Number of substeps 输入栏中输入 4，在 Max no. of substeps 输入栏中输入 25，在 Min no. of substeps 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：进行求解设置。

15）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该

对话框。

16）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉菜单中选择 FY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入 F，单击 OK 按钮关闭该对话框。



17）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入-F，单击 OK 按钮关闭该对话框。

20）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

22）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入 F，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

25）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入-F，单击 OK 按钮关闭该对话框。

26）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

27）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM Load step file number n 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

28）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On

Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 VALUE　Force/moment value 输入栏中输入 F，单击 OK 按钮关闭该对话框。

29）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

30）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Write LS File 命令，出现 Write Load Step File 对话框，在 LSNUM　Load step file number n 输入栏中输入 7，单击 OK 按钮关闭该对话框。

31）选择 Main Menu | Solution | Solve | From LS Files 命令，出现 Solve Load Step Files 对话框，在 LSMIN　Starting LS file number 输入栏中输入 1，在 LSMAX　Ending LS file number 输入栏中输入 7，在 LSINC　File number increment 输入栏中输入 1，如图 5-72 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

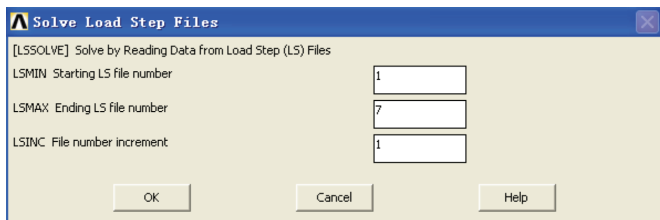


图 5-72　根据载荷步文件进行求解对话框

提示：按照载荷步文件依次进行求解。

32）求解完毕之后，出现 Note 提示框，单击 OK 按钮关闭该对话框。

33）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-2.db，保存求解结果。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取最后一步的求解结果。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND　Items to be plotted 选项栏中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的几何形状，如图 5-73 所示。

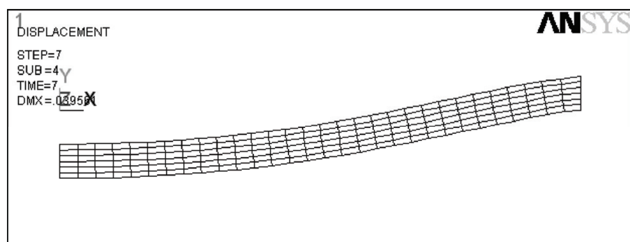


图 5-73　变形形状显示

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-74 所示的 X 方向位移等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-75 所示的 Y 方向位移等值线图。

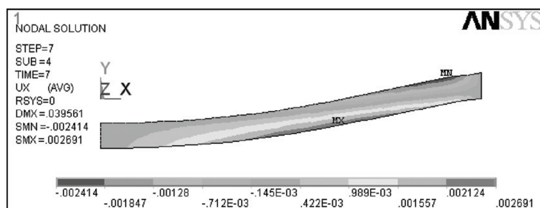


图 5-74 X 方向位移等值线图

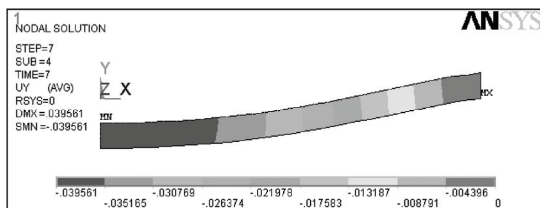


图 5-75 Y 方向位移等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-76 所示的合位移等值线图。

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-77 所示的 X 方向应力等值线图。

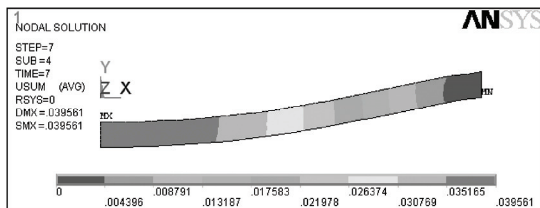


图 5-76 合位移等值线图

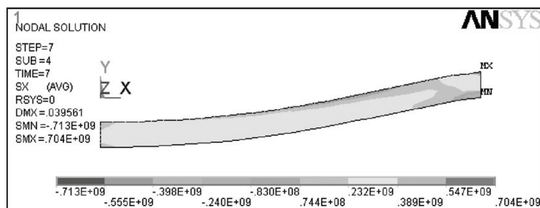


图 5-77 X 方向应力等值线图

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-78 所示的 Y 方向应力等值线图。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-79 所示的等效应力等值线图。

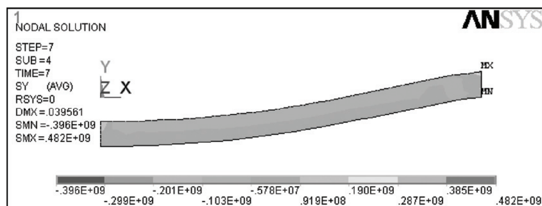


图 5-78　Y 方向应力等值线图

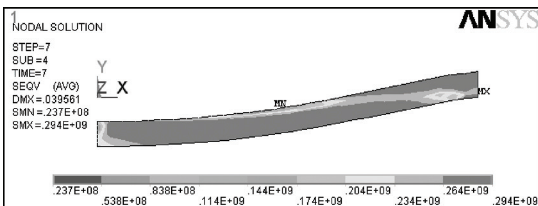
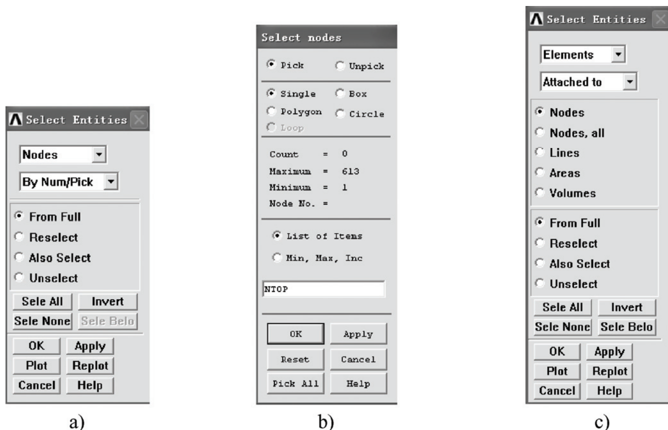


图 5-79　等效应力等值线图

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-80a 对其进行设置，单击 OK 按钮，出现 Select nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，如图 5-80b 所示，单击 OK 按钮关闭该菜单。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-80c 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a)　　　　b)　　　　c)

图 5-80　选择实体

提示：以上两步操作是为了得到节点 NTOP 所附属的单元。

11）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 ELEM=ELNEXT（0），单击 Accept 按钮后再单击 Close 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Element results，单击 OK 按钮，出现 Define Elemental Data 拾取菜单，在输入栏中输入 ELEM，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NTOP，单击 OK 按钮，出现 Define Element Results Variable 对话框，参照图 5-81 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：图 5-81 中的单元及节点编号分别为变量 ELEM 及 NTOP 所代表的数值。

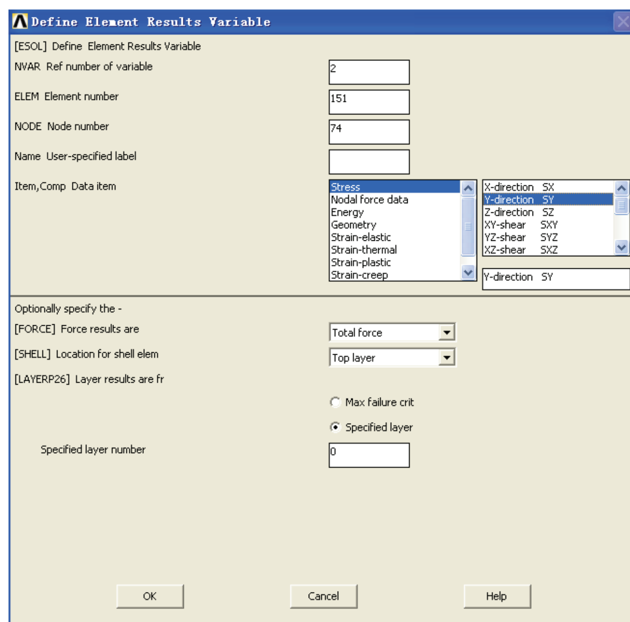


图 5-81　定义时间历程变量

14）重复第 13）步的操作过程直至出现 Define Element Results Variable 对话框，在 NVAR　Ref number of variable 输入栏中输入 3，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 Strain-elastic，Y-dir'n EPEL Y，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

15）重复第 13）步的操作过程直至出现 Define Element Results Variable 对话框，在 NVAR　Ref number of variable 输入栏中输入 4，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 Strain-plastic，Y-dir'n EPPL Y，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Math Operations | Add 命令，出现 Add Time-History Variables 对话框，参照图 5-82 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

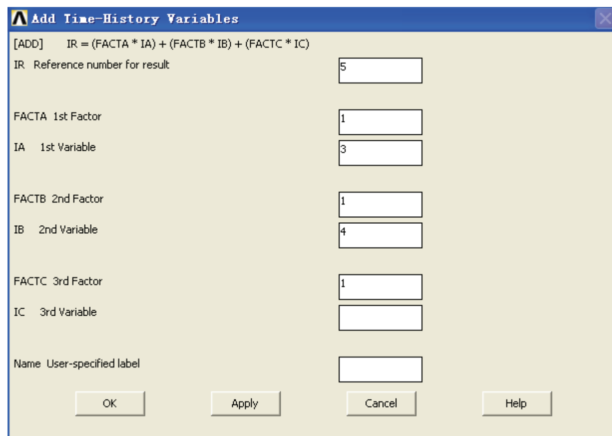


图 5-82　变量相加操作对话框

提示：将各节点的弹性应变和塑性应变相加，并将计算结果存储到变量 5 中。

17）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］ X-axis label 输入栏中输入 TIME，在［/AXLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 Y-STRESS，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置曲线图的坐标轴标题。

18）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 D 点 Y 方向应力同时间的关系曲线图，如图 5-83 所示。

19）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］ X-axis label 输入栏中输入 TOTAL Y-STRAIN，在［/AXLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 Y-STRESS，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

20）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Setting | Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在 Single variable no.输入栏中输入 5，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将曲线图的横坐标设置为塑性应变。

21）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 D 点 Y 方向应力同塑性应变的关系曲线图，如图 5-84 所示。

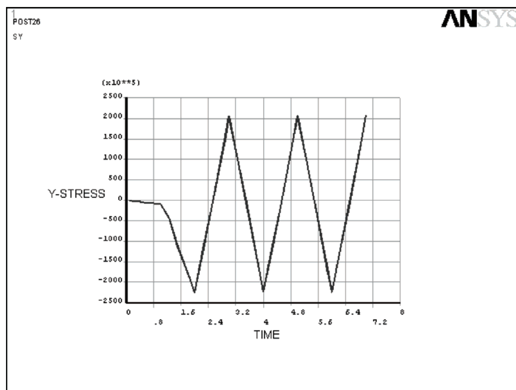


图 5-83 D 点 Y 方向应力同时间的关系曲线

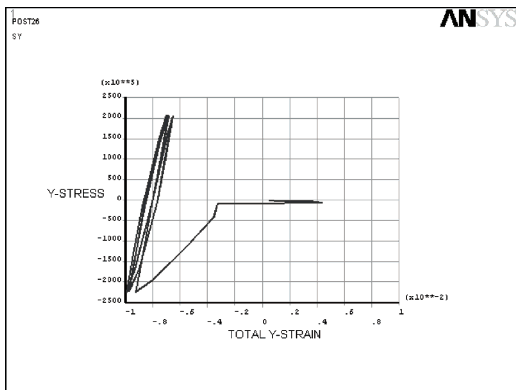


图 5-84 D 点 Y 方向应力同塑性应变的关系曲线

22）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：如果圆盘只承受均布载荷 P 或周期载荷 F 的作用，试求解此时圆盘内部的应力、应变响应。

5.4.4 命令流



```
/FILNAME，EXERCISE3                          ！定义工作文件名
/TITLE，CYCLIC LOADING OF A FIXED CIRCULAR PLATE
                                             ！定义工作标题
/PREP7                                       ！进入前处理器
ET，1，PLANE183                              ！定义单元类型
KEYOPT，1，3，1                              ！定义单元关键字
MP，EX，1，1.2E11                            ！输入材料弹性模量
MP，NUXY，1，0.3                             ！输入材料泊松比
TB，KINH，1，1，5                            ！定义材料模型
TBPT,，0.0011，1.32E8                        ！输入材料应力、应变值
TBPT,，0.0018，1.89E8
TBPT,，0.0026，2.21E8
TBPT,，0.0045，2.70E8
TBPT,，0.0098，2.94E8
/AXLAB，X，LOG STRAIN                        ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，TRUE STRESS (MPa)                 ！指定 Y 坐标轴标题
TBPL，KINH，1                                ！绘制应力、应变关系曲线

RECTNG，0，0.3，0，0.02                      ！生成矩形面
/PNUM，LINE，1                               ！显示线段编号
LSEL，S,,，1，3，2                           ！选择线段
LESIZE，ALL,,，30                            ！设置线段等分数
LSEL，S,,，2，4，2
LESIZE，ALL,,，6
AMESH，ALL                                   ！对面进行网格划分
EPLOT                                        ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                        ！进入求解器
NLGEOM，ON                                   ！启动大应变选项
NSUBST，10，25，2                            ！指定计算子步数
OUTRES，ALL，ALL                             ！存储求解结果选项设置
NTOP=NODE(0，0.02，0)                        ！根据节点坐标获取节点编号
NRIGHT=NODE(0.3，0，0)
NSEL，S，LOC，X，0.3                         ！选择节点
D，ALL，ALL                                  ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，X，0
D，ALL，UX，0
NSEL，S，LOC，Y，0.02
SF，ALL，PRES，1E7                           ！施加压力载荷
ALLSEL                                       ！选择所有实体
LSWRITE，1                                   ！写入到载荷步文件 1

F=1E4
NSEL，S，NODE,，NTOP
F，ALL，FY，-F                               ！施加集中力载荷
```

```
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，2                                  ！写入到载荷步文件 2
NSEL，S，NODE，，NTOP
F，ALL，FY，F
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，3                                  ！写入到载荷步文件 3
NSEL，S，NODE，，NTOP
F，ALL，FY，-F
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，4                                  ！写入到载荷步文件 4
NSEL，S，NODE，，NTOP
F，ALL，FY，F
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，5                                  ！写入到载荷步文件 5
NSEL，S，NODE，，NTOP
F，ALL，FY，-F
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，6                                  ！写入到载荷步文件 6
NSEL，S，NODE，，NTOP
F，ALL，FY，F
ALLSEL
NSUBST，4，25，2
LSWRITE，7                                  ！写入到载荷步文件 7
LSSOLVE，1，7，1                            ！按载荷步文件求解
SAVE
FINISH

/POST1
SET，LAST                                   ！读取最终求解结果
PLDISP，0                                   ！显示变形形状
PLNSOL，U，X                                ！绘制 X 方向位移等值线图
PLNSOL，U，Y                                ！绘制 Y 方向位移等值线图
PLNSOL，U，SUM                              ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，X                                ！绘制 X 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                                ！绘制 Y 方向应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                              ！绘制等效应力等值线图
FINISH

/POST26                                     ！进入 POST26 后处理器
NSEL，S，NODE，，NTOP                       ！选择节点
ESLN                                        ！选择节点单元
ELEM=ELNEXT(0)                              ！获取单元编号
ALLSEL                                      ！选择所有实体
ESOL，2，ELEM，NTOP，S，Y                   ！定义变量
ESOL，3，ELEM，NTOP，EPEL，Y
ESOL，4，ELEM，NTOP，EPPL，Y
```

```
ADD，5，3，4，，，，，1，1，0                      ！变量相加
/AXLAB，X，TIME                                  ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，Y-STRESS                              ！指定 Y 坐标轴标题
PLVAR，2                                         ！曲线显示变量
XVAR，5                                          ！指定 X 轴变量
/AXLAB，X，TOTAL Y-STRAIN
/AXLAB，Y，Y-STRESS
PLVAR，2
FINISH
/EXIT，ALL                                       ！退出 ANSYS
```

5.5 几何非线性实例详解——膜结构分析

5.5.1 问题描述

一个膜结构如图 5-85 所示，其对角线距离为 30m，高度为 5m，厚度为 1.2mm。膜结构 4 个角点固定，4 条边为柔性索边界，其横截面积为 200mm^2。膜面初始预张力为 4.5kN/m，张拉刚度为 300kN/m，边索弹性模量为 200GPa，泊松比为 0.3。试对该膜结构进行分析。

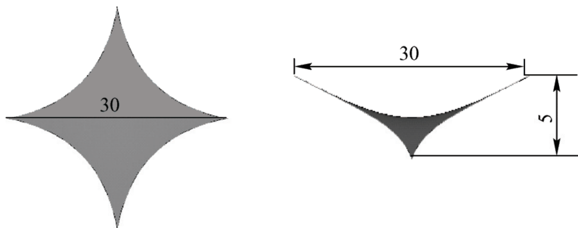


图 5-85 膜结构示意图

5.5.2 问题分析

该问题属于膜结构工程问题，分析之前进行以下假设：

1）索膜之间无相对滑动；

2）索膜张拉变形为小应变；

3）膜材料为正交各向异性弹性材料。

分别采用 2 节点空间铰接单元 LINK180 和 3 节点三角形壳单元 SHELL41 表征索膜结构进行分析计算。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 LINK10 杆单元。

5.5.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu｜File｜Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框。在输入栏中输入工作文件名 EXERCISE4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 MEMBRANE STRUCTURE ANALYSIS，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框。单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Shell，Membrane 41，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-86 所示，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link，3D finit stn 180，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

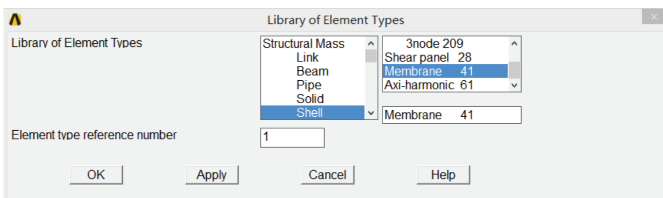


图 5-86 单元类型列表对话框

2）在 Element Types 对话框中选择 Type 1 SHELL41，单击 Options 按钮，出现 SHELL41 element type options 对话框，在 Element stiffness behavior K1 下拉选框中选择 Tension only，如图 5-87 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

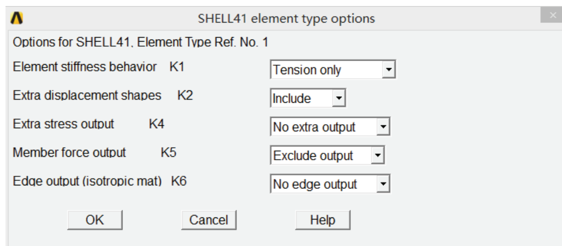


图 5-87 SHELL41 单元关键字选项设置对话框

3）在 Element Types 对话框中选择 Type 2 LINK180，单击 Options 按钮，出现 LINK180 element type options 对话框，在 Cross section scaling is K2 下拉选框中选择 Rigid（classic），单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框。单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，在列表框中选择 Type 1 SHELL41，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for SHELL41 对话框，在 Shell thickness at node I TK（I）输入栏中输入 0.0012，如图 5-88 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

6）单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，在列表框中选择 Type 2 LINK10，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 2，for LINK180，参照图 5-89 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮，关

闭该对话框。

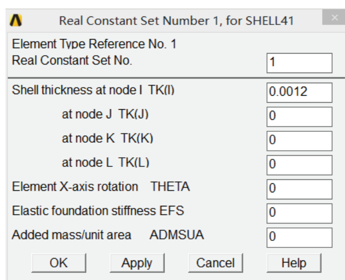

Real Constant Set Number 1, for SHELL41
Element Type Reference No. 1
Real Constant Set No. 1
Shell thickness at node I TK(I) 0.0012
at node J TK(J) 0
at node K TK(K) 0
at node L TK(L) 0
Element X-axis rotation THETA 0
Elastic foundation stiffness EFS 0
Added mass/unit area ADMSUA 0
OK Apply Cancel Help

图 5-88 SHELL41 单元实常数设置对话框

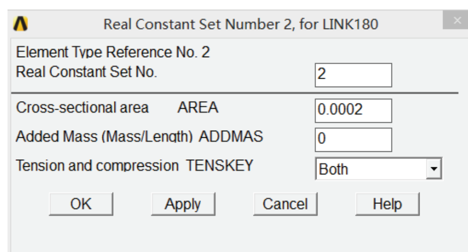

Real Constant Set Number 2, for LINK180
Element Type Reference No. 2
Real Constant Set No. 2
Cross-sectional area AREA 0.0002
Added Mass (Mass/Length) ADDMAS 0
Tension and compression TENSKEY Both
OK Apply Cancel Help

图 5-89 LINK180 单元实常数设置对话框

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3E5，在 PRXY 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Isotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 15，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E8，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设定索和膜的虚拟弹性模量，根据经验，采用比实际弹性模量值小 3 个数量级的数值。设定膜的虚拟热膨胀系数是为了使膜面找形后获得设定的预应力，并不参加实际运算，因此可以人为设定。

6）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，如图 5-90 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

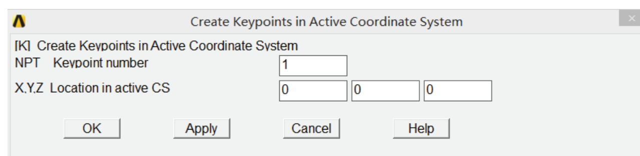

Create Keypoints in Active Coordinate System
[K] Create Keypoints in Active Coordinate System
NPT Keypoint number 1
X,Y,Z Location in active CS 0 0 0
OK Apply Cancel Help

图 5-90 创建关键点对话框

2）参照上一步的操作步骤，创建以下关键点：

2（15，0，0）；　3（7.5，7.5，0）；　4（7.5，-7.5，0）

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | Through KPs 命令，出现 Create Area thru 拾取菜单，在输入栏中输入 1，4，2，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过关键点创建面。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | All Lines 命令，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将所有线段 20 等分。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［Type］ Element type number 下拉选框中选择 1 SHELL41，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，在［REAL］ Real constant set number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置将要生成的单元的属性，包括单元类型、材料参考号及实常数。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts 命令，出现 Mesher Options 对话框，在 KEY Mesher Type 选项中选择 Mapped，其余选项采用默认设置，如图 5-91 所示，单击 OK 按钮，出现 Set Element Shape 对话框，在 2D Shape key 下拉选框中选择 Tri，单击 OK 按钮关闭该对话框。

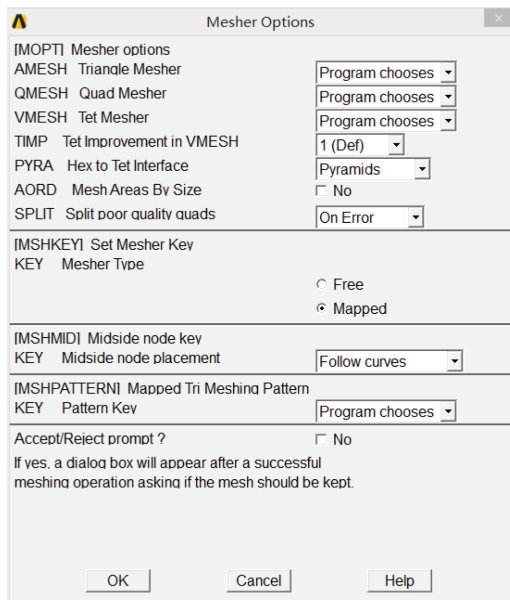


图 5-91　单元划分属性设置对话框

提示：选择三角形划分单元。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | MeshTool 命令，出现 MeshTool 对话框，单击 Mesh 按钮，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。单击 MeshTool 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［Type］ Element type number 下拉选框中选择 2 LINK10，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，在［REAL］ Real constant set number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Lines 命令，出现 Mesh Lines 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口显示所生成的有限元模型，如图 5-92 所示。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Elements，在第 2 个下拉菜单中选择 By Attributes，在第 3 栏中选择 Elem type num，在 Min,Max，Inc 输入栏中输入 2，在第 5 栏中选择 From Full，如图 5-93 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择所有的 LINK180 单元。

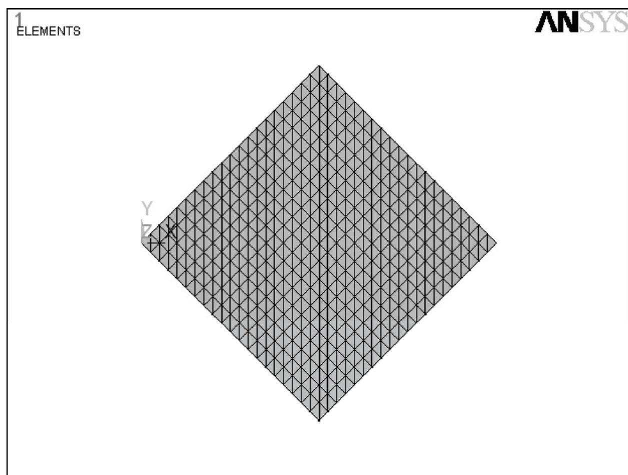


图 5-92 网格划分结果显示

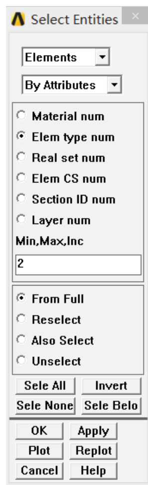


图 5-93 选择实体设置对话框

12）在 Utility Menu 的输入栏中输入 INISTATE,SET,DTYP,EPEL，单击键盘上的〈Enter〉键；再次输入 INISTATE,DEFI, ,,,,0.999，单击〈Enter〉键确认。

提示：对 LINK180 单元设置初始应变，该命令没有对应的 GUI 操作方式。注意，命令中的逗号均为英文格式。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在输入栏中输

入 EXERCISE4-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-94 对其进行设置；单击 Nonlinear 选项卡，在 Line search 下拉选框中选择 On，如图 5-95 所示，单击 Set convergence criteria 按钮，出现 Nonlinear Convergence Criteria 对话框，单击 Add 按钮，出现 Nonlinear Convergence Criteria 对话框，参照图 5-96 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 OK 按钮关闭 Solution Controls 对话框。

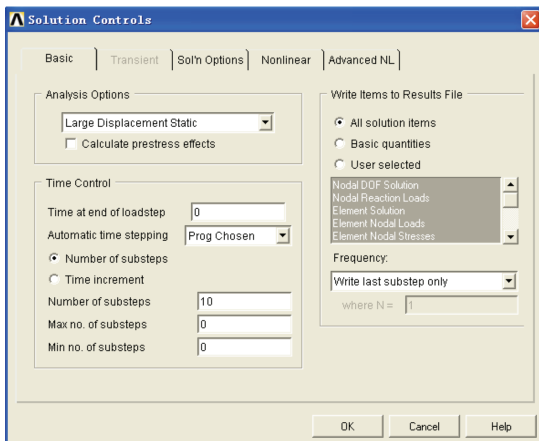


图 5-94　求解控制基本选项设置对话框

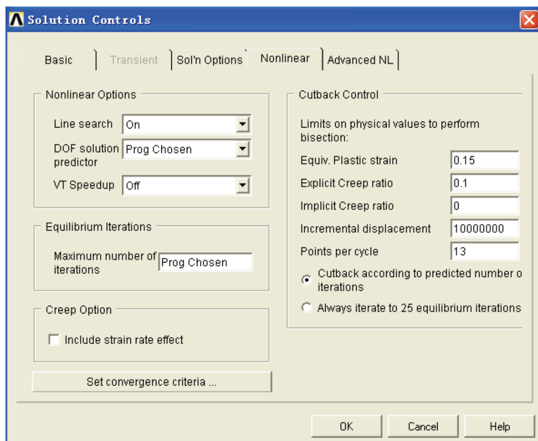


图 5-95　求解控制非线性选项设置对话框

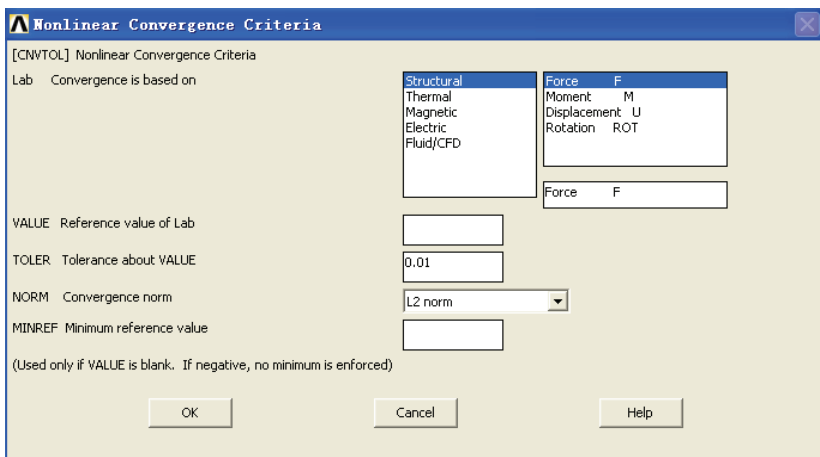


图 5-96　非线性收敛准则设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints 命令，出现 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply

U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 5-97 所示。单击 OK 按钮关闭该对话框。

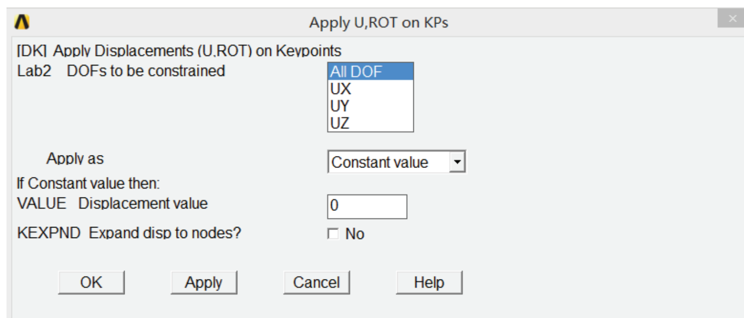


图 5-97　施加位移载荷对话框

提示：在关键点上施加位移约束。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints 命令，出现 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 UZ，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在关键点上施加位移载荷。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | On Areas 命令，出现 Apply TEMP on Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply TEMP on Areas 对话框，在 VAL1　Temperature 输入栏中输入-1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此处温度值根据公式 $T=\sigma/E\alpha t$ 计算得出，其中 σ 为膜面初始预应力； E 为膜材虚拟弹性模量； α 为膜材热膨胀系数； t 为膜材厚度。

6）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框上的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在输入栏中输入 EXERCISE4-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Viewing Settings | Viewing Driection 命令，出现 Viewing Driection 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中依次输入 0、-1、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置视图显示方向。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def shape only 单选按钮，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显

示第 1 次找形结果，如图 5-98 所示。

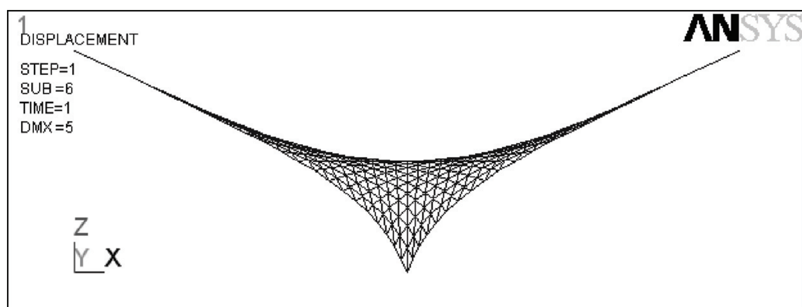


图 5-98　第 1 次找形结果显示

7．进行自平衡迭代非线性求解

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Defined 列表框中依次单击 Material Model Number 1、Linear Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3E8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Defined 列表框中依次单击 Material Model Number 1、Thermal Expansion 选项，出现 Thermal Expansion Secant for Material Number 1 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 0.015，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Defined 列表框中依次单击 Material Model Number 2、Linear Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E11，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Elements，在第 2 个下拉菜单中选择 By Attributes，在第 3 栏中选择 Elem type num，在 Min,Max 输入栏中输入 2，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Utility Menu 的输入栏中输入 INISTATE,SET,DTYP,EPEL，单击键盘上的〈Enter〉键；再次输入 INISTATE,DEFI, ,,,,0.001，单击〈Enter〉键确认。

7）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints 命令，出现 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Other | Updt Node Coord 命令，出现 Update Nodal Coordinates 对话框，在 FACTOR Multiply displacements by 输入栏中输入 1，在 KEY Set displacements to zero 单选框中选择 OFF，如图 5-99 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

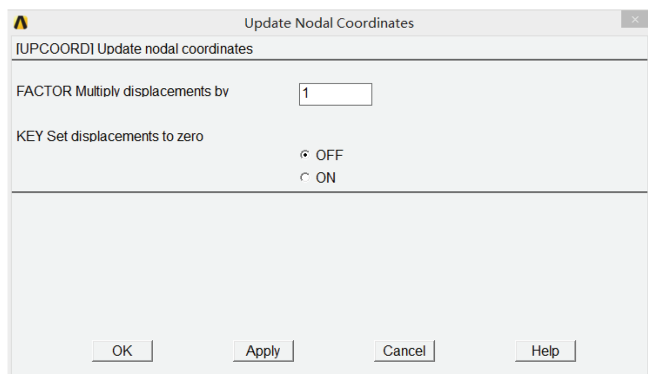


图 5-99　更新节点坐标对话框

10）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框上的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

11）重复第 9）、10）步的操作过程 3 次，进行自平衡迭代求解。

12）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在输入栏中输入 EXERCISE4-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8．再次查看求解结果

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Viewing Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Driection 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中依次输入 0、-1、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：设置视图显示方向。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def shape only 单选按钮，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示自平衡迭代后的形态，如图 5-100 所示。

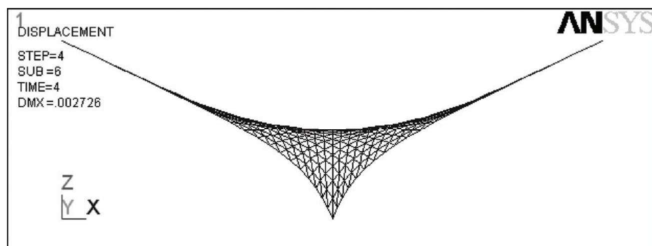


图 5-100　自平衡迭代后形态显示

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Viewing Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中依次输入 0、0、1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按

钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-101 所示的自平衡迭代后等效应力场分布等值线图。

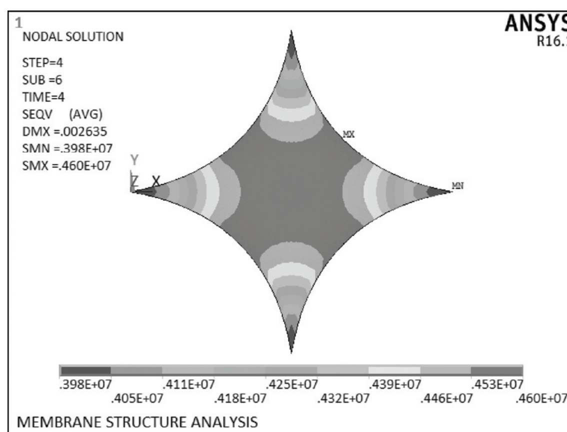
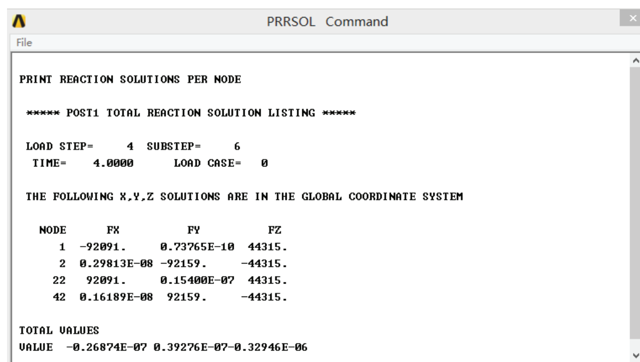


图 5-101　自平衡迭代后等效应力分布等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab　Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示自平衡迭代后支反力结果，如图 5-102 所示。




```
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

 ***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

 LOAD STEP=     4  SUBSTEP=     6
  TIME=    4.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

   NODE      FX           FY           FZ
      1  -92091.      0.73765E-10  44315.
      2  0.29813E-08 -92159.      -44315.
     22   92091.      0.15400E-07  44315.
     42  0.16189E-08  92159.      -44315.

TOTAL VALUES
VALUE  -0.26874E-07 0.39276E-07-0.32946E-06
```

图 5-102　自平衡迭代后支反力结果显示

6）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

✍ **试一试**：改变膜的结构或其张拉刚度，依据本例的求解思路进行建模求解，分析求解结果随膜的结构或刚度的变化规律。

5.5.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE4                          ！定义工作文件名
/TITLE，MEMBRANE STRUCTURE ANALYSIS          ！定义工作标题

/PREP7                                       ！进入前处理器
ET，1，SHELL41                               ！定义单元类型
ET，2，LINK180
```



```
KEYOPT，1，1，2                                    ！定义单元关键字
KEYOPT，2，2，1
R，1，0.0012                                       ！定义实常数
RMORE
R，2，0.0002
MP，EX，1，3E5                                     ！定义材料参数
MP，PRXY，1，0
MP，ALPX，1，15
MP，EX，2，2E8
MP，PRXY，2，0.3

K，1，0，0，0                                      ！创建关键点
K，2，15，0，0
K，3，7.5，7.5，0
K，4，7.5，-7.5，0
A，1，4，2，3
LESIZE，ALL,,，20
MAT，1
REAL，1
TYPE，1
MSHAPE，1，2D
MSHKEY，1
AMESH，1                                           ！对面进行网格划分
MAT，2
REAL，2
TYPE，2
LMESH，ALL
ESEL，S，TYPE,，2
INISTATE，SET，DTYP，EPEL                          ！设定为初应变
INISTATE，DEFI,,,,，0.999                          ！设定初始应变为 0.999
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU                                              ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                     ！指定求解类型
NLGEOM，ON                                         ！启动大变形选项
NSUBST，10
LNSRCH，1
CNVTOL，F,，0.01，2                                ！设置收敛准则
DK，ALL，ALL                                       ！施加位移约束
DK，1，UZ，5
DK，2，UZ，5
BFA，1，TEMP，-1                                   ！施加温度载荷
SOLVE                                              ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                             ！进入后处理器
/VIEW，1,，-1                                      ！设置视图显示方向
```

```
PLDISP，0                                          ！显示变形结果
FINISH

/PREP7
R，2，0.0002，0.001
MP，EX，2，2E11
MP，EX，1，3E8
MP，ALPX，1，0.015
ESEL，S，TYPE，，2
INISTATE，SET，DTYP，EPEL
INISTATE，DEFI，，，，，0.001
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU
DK，ALL，ALL
UPCOORD，1，OFF
SOLVE
/SOLU
UPCOORD，1，OFF
SOLVE
/SOLU
UPCOORD，1，OFF
SOLVE
/SOLU
UPCOORD，1，OFF
SOLVE
SAVE
FINISH

/POST1
/VIEW，1，，-1
PLDISP，0
/VIEW，1，，
PLNSOL，S，EQV
PRRSOL
FINISH
/EXIT                                              ！退出 ANSYS
```

5.6 材料非线性实例详解——螺栓蠕变松弛分析

5.6.1 问题描述

图 5-103 所示为一枚长度为 L、横截面积为 A 的螺栓，开始时受大小为σ_0的预紧力，螺栓在 900℃条件下工作 1000h，求在不同时段螺栓由于蠕变松弛而引起的应力。

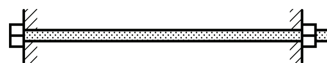


图 5-103 螺栓结构示意图

螺栓几何参数：

L=150mm；A=100mm^2

螺栓材料参数：

E=200GPa；蠕变应变率：$d\varepsilon/dt=K\sigma^n$，$K=5\times10^{-30}s^{-1}$；n=7

载荷：

σ_0=1000MPa

5.6.2 问题分析

螺栓的初始应变：$\varepsilon_0=\sigma_0/E=1000/200000=0.005$；计算时间为 1000h，积分时间步选择 10，迭代次数选择 100；选择 LINK180 杆单元进行求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS12.0 的 LINK1 杆单元。

5.6.3 求解步骤

1. 定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在[/FILNAM] Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 STRESS RELAXATION OF A BOLT DUE TO CREEP，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2. 定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Link，3D finit stn 180，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 1 LINK180，单击 OK 按钮，出 Real Constant Set Number 1，for LINK180 对话框，参照图 5-104 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

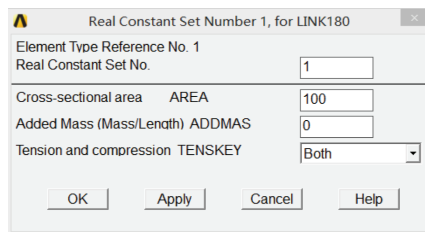


图 5-104 LINK180 单元实常数设置对话框

4）单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3. 定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Nonlinear、Inelastic、Rate Dependent、Creep、Creep only、Mises Potential、Explict 选项，出现 Creep Table for Material Number 1 对话框，参照图 5-105 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

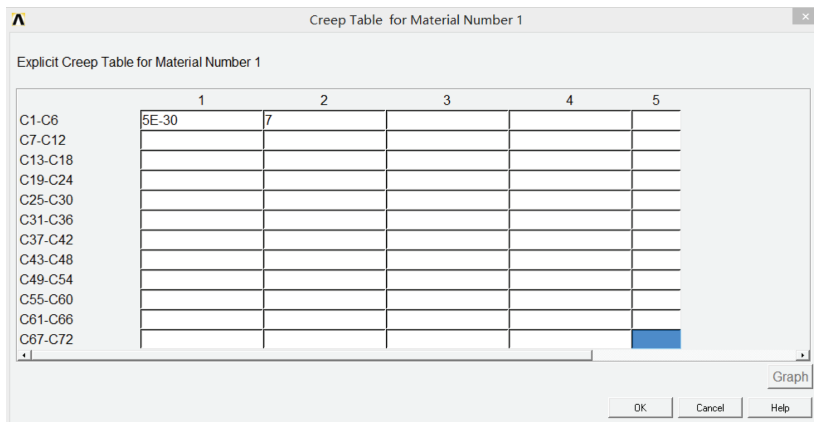


图 5-105 输入材料蠕变参数对话框

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建有限元模型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes In Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 的 3 个输入栏中分别输入 0、0、0，单击 Apply 按钮；在 NODE Node number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z Location in active CS 的 3 个输入栏中分别输入 150、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：采用直接建模法，创建节点。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Utility Menu 的输入栏中输入 INISTATE,SET,DTYP,EPEL，单击键盘上的〈Enter〉键；再次输入 INISTATE,DEFI,1,ALL,ALL,ALL,0.005，单击〈Enter〉键确认。

提示：对 LINK180 单元设置初始应变，该命令没有对应的 GUI 操作方式。注意，命令中的逗号均为英文格式。

4）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-106 对其进行设置，单击 Nonlinear 选项卡，参照图 5-107 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

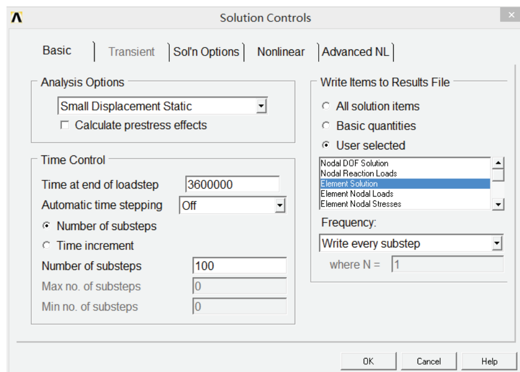


图 5-106　求解基本选项设置对话框

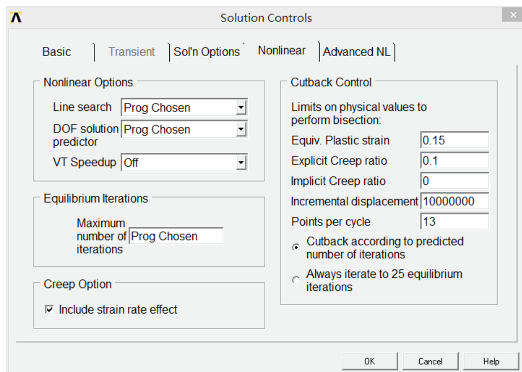


图 5-107　求解非线性选项设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 900，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：施加均匀温度载荷。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，如图 5-108 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

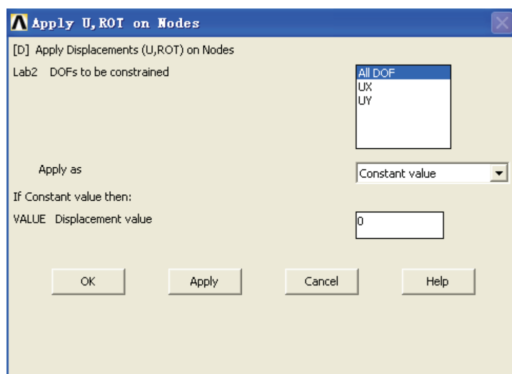


图 5-108　施加位移约束对话框

5）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

6）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE5-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Define Variables 命令，出现 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，在 Type of variable 选项中选择 by seq no.，单击 OK 按钮，出现 Define Element R 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Define Element Results by Seq No.对话框，参照图 5-109 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Math Operations｜Multiply 命令，出现 Multiply Time-History Variables 对话框，在 IR Reference number for result 输入栏中输入 3，在 FACTA 1st Factor 输入栏中输入 1/3600，在 IA 1st Variable 输入栏输入 1，如图 5-110 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作将时间单位转变为小时。

4）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Setting｜Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在［XVAR］ X-axis variable 选项中选择 Single variable，在 Single variable no.输入栏中输入 3，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以小时为曲线图的 X 坐标。

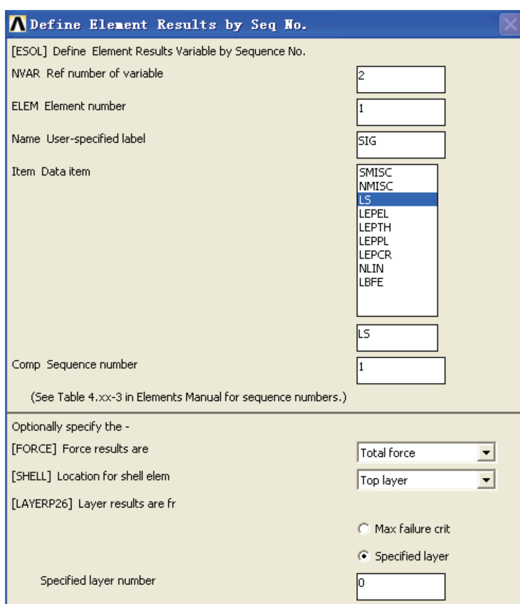


图 5-109 定义单元结果变量对话框

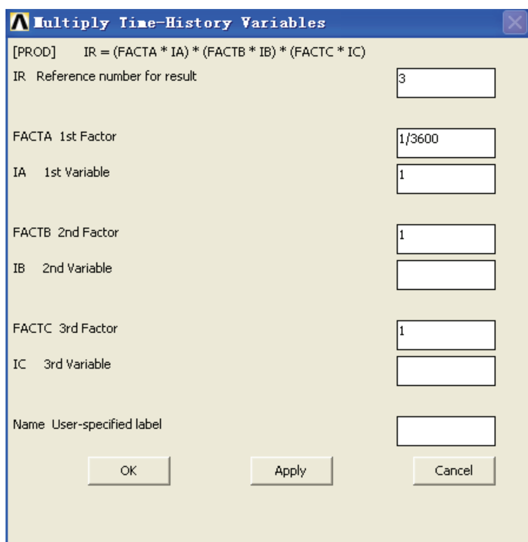


图 5-110 多层时间-历程变量对话框

5）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，参照图 5-111 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

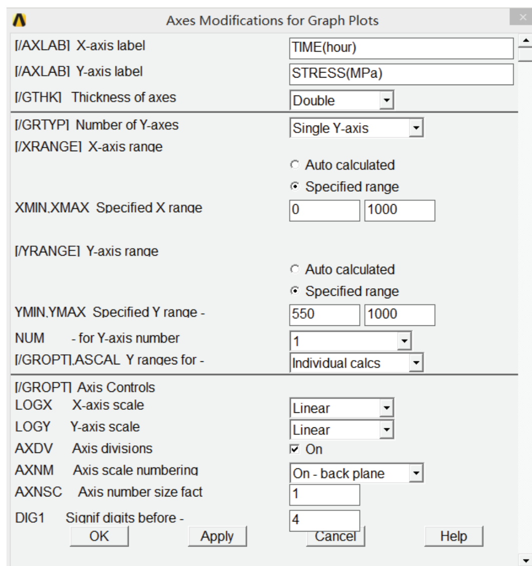


图 5-111 坐标轴设置对话框

6）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Graph Colors 命令，出现 Graph Colors 对话框，在 CURVE Graph curve number 1 下拉菜单中将颜色选择为红色，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示螺栓轴向应力和时间的变化关系曲线，如图 5-112 所示。

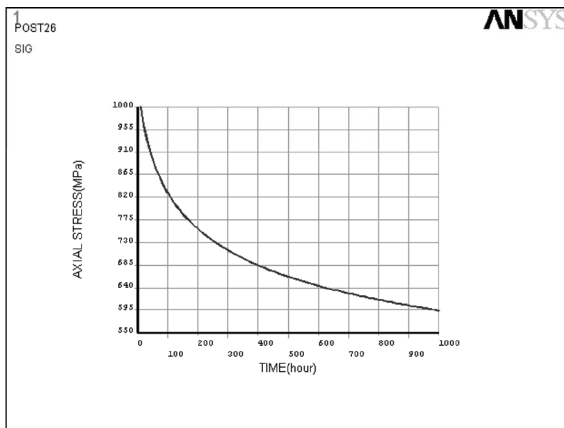


图 5-112 螺栓轴向应力和时间的变化关系曲线

8）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data，Time-hist var's，如图 5-113 所示。

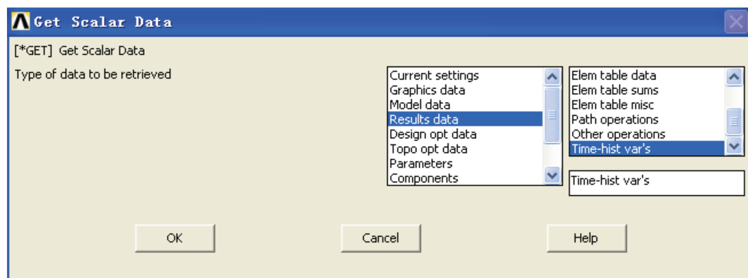


图 5-113　获取参量信息对话框

9）单击 OK 按钮，出现 Get Data for Time-history Variables 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 T050，在 Variable number N 输入栏中输入 2，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Real val @ time>，在 Time or location number 输入栏中输入 50*3600，如图 5-114 所示。

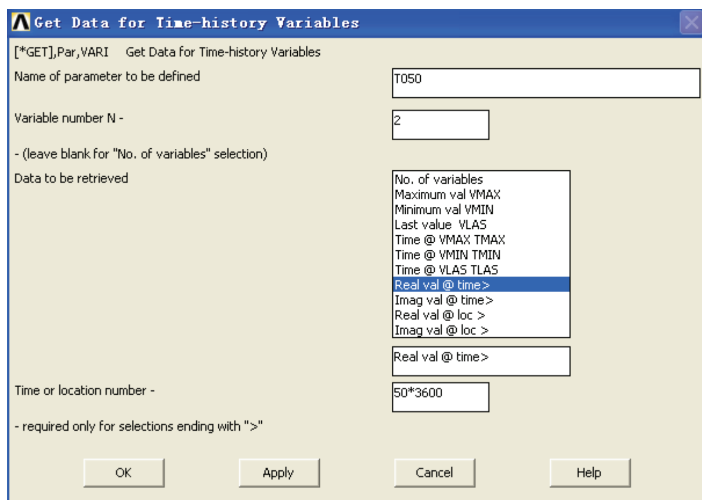


图 5-114　获取时间历程变量信息对话框

提示：此操作将时间为 50h 时的螺栓轴向应力值输入给变量 T050。

10）参照第 8）和第 9）步的操作过程，分别获取以下时间段和变量名的变量信息：

（T150，150*3600）；（T250，250*3600）；（T350，350*3600）；

（T450，450*3600）；（T550，550*3600）；（T650，650*3600）；

（T750，750*3600）；（T850，850*3600）；（T950，950*3600）

11）选择 Utility Menu | List | Status | Parameters | All Parameters 命令，ANSYS 显示窗口将列表显示不同时间段的轴向应力值，如图 5-115 所示。

提示：输出应力单位为 MPa。

12）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

```
PARAMETER STATUS-          (      14 PARAMETERS DEFINED)
                (INCLUDING        4 INTERNAL PARAMETERS)

NAME                              VALUE                        TYPE  DIMENSIONS
T050                              891.109253                    SCALAR
T150                              791.414795                    SCALAR
T250                              738.230164                    SCALAR
T350                              702.764587                    SCALAR
T450                              676.499756                    SCALAR
T550                              655.815063                    SCALAR
T650                              638.851257                    SCALAR
T750                              624.533386                    SCALAR
T850                              612.186584                    SCALAR
T950                              601.360840                    SCALAR
```

图 5-115　不同时间段的轴向应力结果显示

试一试：读者可延长螺栓的工作时间，即增加求解时间，观察求解结果的变化。

5.6.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE5                                  ！定义工作文件名
/TITLE，STRESS RELAXATION OF A BOLT DUE TO CREEP
                                                      ！定义工作标题
/PREP7                                                ！进入前处理器
ET，1，LINK180                                        ！定义单元类型
R，1，100                                             ！定义单元实常数
MP，EX，1，2E5                                        ！输入弹性模量
TB，CREEP，1，1，1，1                                 ！指定材料模型
TBDATA，1，5E-30，7                                   ！定义蠕变性能参数
/PNUM，NODE，1                                        ！显示节点编号
N，1                                                  ！创建节点
N，2，150
E，1，2                                               ！由节点创建单元
INISTATE，SET，DTYP，EPEL                             ！设定为初应变
INISTATE，DEFI，1，ALL，ALL，ALL，0.005               ！设定初始应变为 0.005
FINISH

/SOLU                                                 ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                        ！指定分析类型
TIME，3600000                                         ！指定计算终止时间
RATE，ON，ON                                          ！打开蠕变控制选项
AUTOTS，OFF                                           ！关闭自动时间步长
NSUBST，100                                           ！定义迭代子步数
OUTRES，ESOL，1                                       ！存储求解结果选项设置
BFUNIF，TEMP，900                                     ！施加均匀温度载荷
D，ALL，ALL                                           ！施加位移约束
SOLVE                                                 ！开始求解计算
FINISH

/POST26                                               ！进入 POST26 后处理器
ESOL，2，1，，LS，1，SIG                              ！定义单元变量
```

```
PROD，3，1，，，，，，1/3600，1，1                    ！变量相乘
XVAR，3                                             ！指定 X 坐标轴变量
/AXLAB，X，TIME(hour)                               ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，AXIAL STRESS(MPa)                        ！指定 Y 坐标轴标题
/XRANGE，0，1000                                    ！指定 X 坐标轴显示范围
/YRANGE，550，1000                                  ！指定 Y 坐标轴显示范围
PLVAR，2                                            ！曲线显示变量
*GET，T050，VARI，2，RTIME，50*3600                 ！获取变量值
*GET，T150，VARI，2，RTIME，150*3600
*GET，T250，VARI，2，RTIME，250*3600
*GET，T350，VARI，2，RTIME，350*3600
*GET，T450，VARI，2，RTIME，450*3600
*GET，T550，VARI，2，RTIME，550*3600
*GET，T650，VARI，2，RTIME，650*3600
*GET，T750，VARI，2，RTIME，750*3600
*GET，T850，VARI，2，RTIME，850*3600
*GET，T950，VARI，2，RTIME，950*3600
*STATUS，PARM                                       ！显示参数
FINISH
/EXIT，ALL                                          ！退出 ANSYS
```

5.7 材料非线性实例详解——橡胶圆筒受压分析

5.7.1 问题描述

有一个无限长橡胶圆筒，其横截面形状如图 5-116 所示，圆筒由 Mooney-Rivlin 材料构成，在其内壁面承受均布压力载荷 P 的作用，求圆筒的应力和位移响应。

几何参数：

外径 R_1=20mm；内径 R_2=5mm

载荷：

P=80MPa

材料参数见表 5.3。

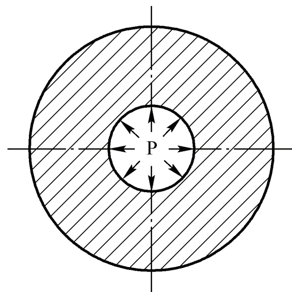


图 5-116 圆筒横截面结构示意图

表 5.3 材料参数表

T_1/℃	A_1/ MPa	B_1/ MPa	T_2/℃	A_2/ MPa	B_2/ MPa	PRXY
20	40	10	40	120	30	0.5

5.7.2 问题分析

考虑到圆筒的无限长特性，忽略其端面效应，按平面应变问题进行分析；同时根据对称性，选取圆筒横截面的 1/4 建立几何模型，并选择 PLANE182 单元进行求解。

提示：在建模过程中，长度单位采用 mm，应力单位采用 MPa。

5.7.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在 [/FILNAM] Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 HYPERELASTIC THICK CYLINDER UNDER INTERNAL PRESSURE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，4node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉菜单中选择 Plane strain，如图 5-117 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

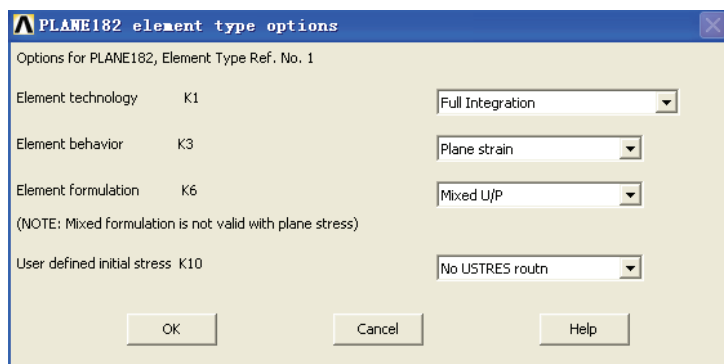


图 5-117 PLANE182 单元关键字设置对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 PRXY 输入栏中输入 0.5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Nonlinear、Elastic、Hyperelastic、Mooney-Rivlin、2 parameters 选项，出现 Hyper-Elastic Table 对话框，参照图 5-118 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

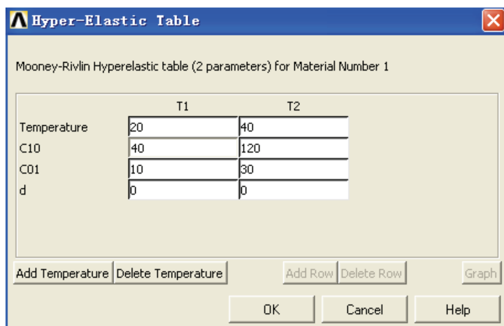


图 5-118　超弹材料参数输入对话框

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Partial Annulus 命令，出现 Part Annular Circ Area 对话框，在 Rad-1 输入栏中输入 5，在 Theta-1 输入栏中输入 0，在 Rad-2 输入栏中输入 20，在 Theta-2 输入栏中输入 90，如图 5-119 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L1、L3 划分为 10 等份。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 16，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

6）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 5-120 所示。

7）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

8）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

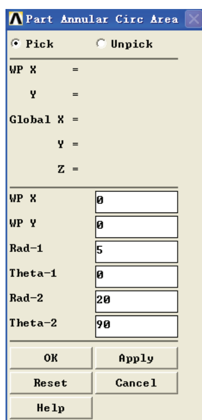


图 5-119 生成圆环面对话框

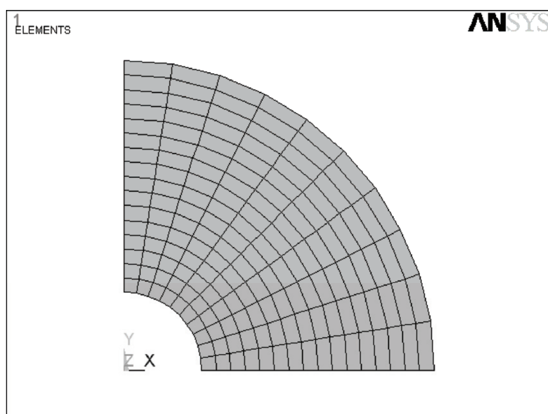


图 5-120 网格划分结果显示

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-121 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Thermal | Temperature | Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：*施加均匀温度载荷。*

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，如图 5-122a 所示，单击 Apply 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-122b 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

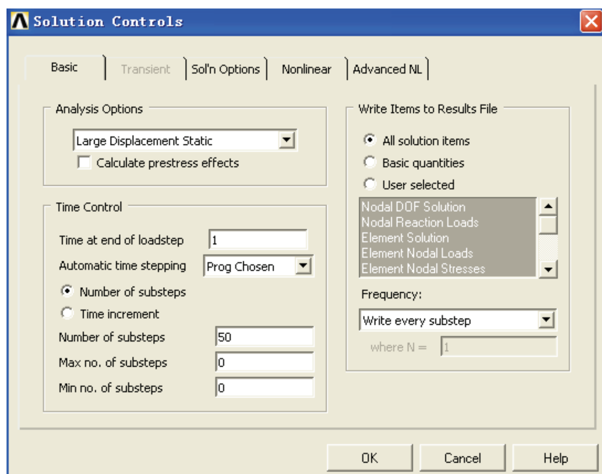


图 5-121 求解基本选项设置对话框

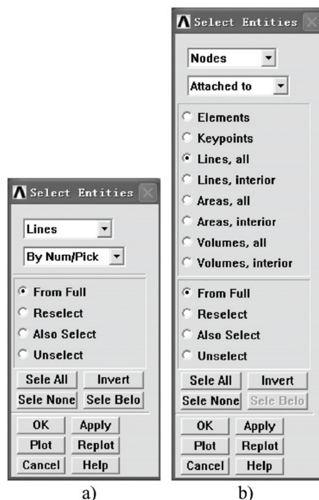


图 5-122 选择实体对话框

提示：以上两步操作是选择编号为 L2 的线段上的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，如图 5-123 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

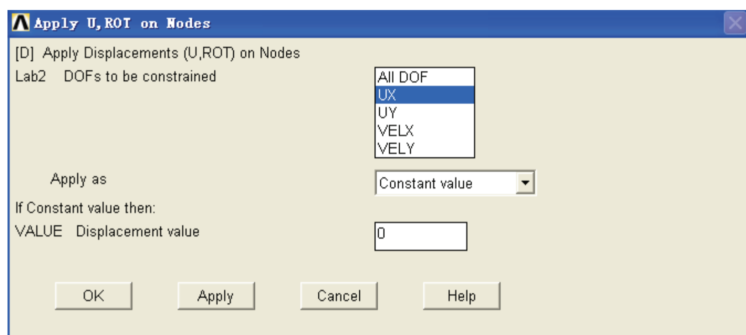


图 5-123　施加位移载荷对话框

提示：在所选节点上施加 X 方向的位移约束。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，单击 Apply 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-122b 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上两步操作是选择编号为 L4 的线段上的所有节点。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加 Y 方向的位移约束。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，单击 Apply 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-122b 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上两步操作是选择编号为 L3 的线段上的所有节点。

12）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on Nodes 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 80，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加压力载荷。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

14）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

15）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE6-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取最后一步的求解结果。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def+ undeformed 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形和未变形的形状，如图 5-124 所示。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-125 所示的合位移等值线图。

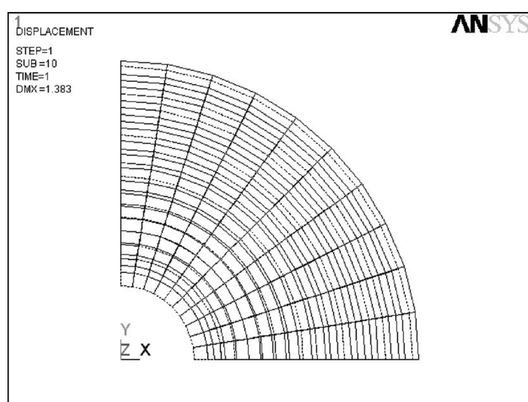


图 5-124 变形和未变形的几何形状

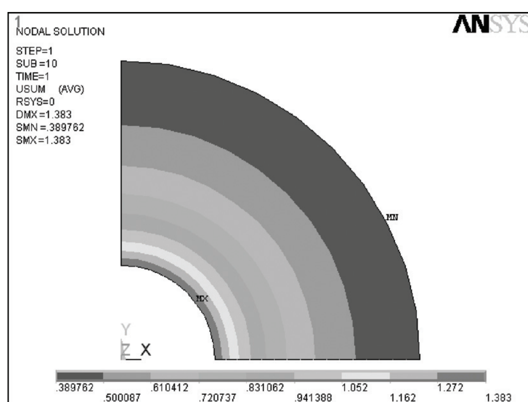


图 5-125 合位移等值线图

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-126 所示的等效应力等值线图。



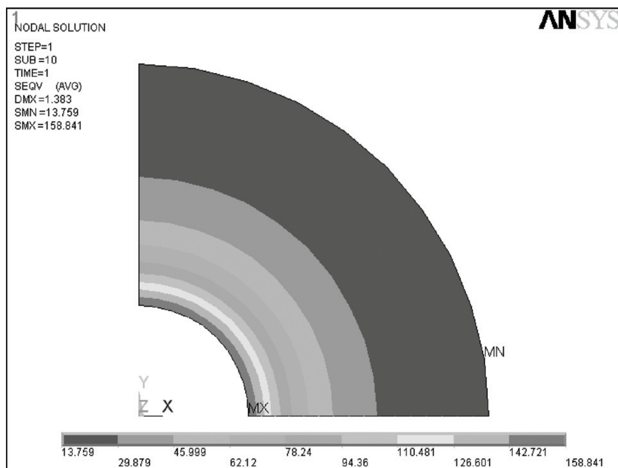
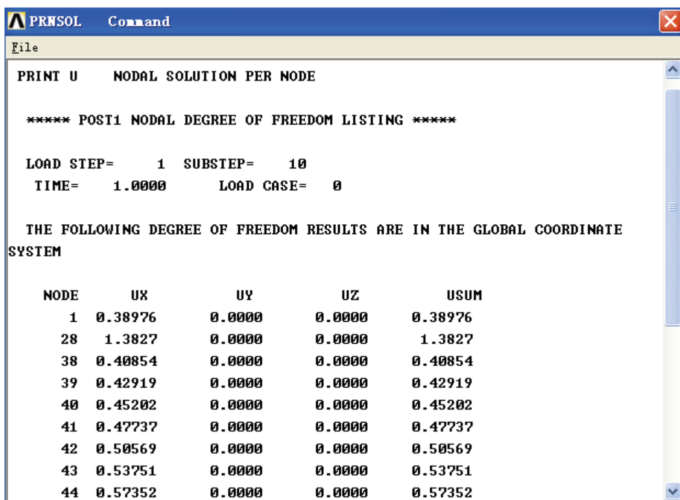


图 5-126 等效应力等值线图

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 X 轴上所有节点的位移结果，如图 5-127 所示。


```
PRNSOL  Command
File
PRINT U    NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=    10
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE
SYSTEM

    NODE      UX          UY          UZ          USUM
       1  0.38976      0.0000      0.0000      0.38976
      28   1.3827      0.0000      0.0000       1.3827
      38  0.40854      0.0000      0.0000      0.40854
      39  0.42919      0.0000      0.0000      0.42919
      40  0.45202      0.0000      0.0000      0.45202
      41  0.47737      0.0000      0.0000      0.47737
      42  0.50569      0.0000      0.0000      0.50569
      43  0.53751      0.0000      0.0000      0.53751
      44  0.57352      0.0000      0.0000      0.57352
```

图 5-127 X 轴上节点位移结果显示

7）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：如果圆筒外部也承受相同的压力，依据本例的求解思路对其进行求解，比

较二者的求解结果。

5.7.4 命令流



```
/FILNAME，EXERCISE6                                    ！定义工作文件名
/TITLE，HYPERELASTIC THICK CYLINDER UNDER INTERNAL PRESSURE
                                                       ！定义工作标题
/PREP7                                                 ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                                        ！选择单元类型
KEYOPT，1，3，2                                        ！设置单元关键字
MP，PRXY，1，0.5                                       ！定义材料性能参数
TB，HYPER，1，2，2，MOONEY
TBTEMP，20
TBDATA，1，40，10
TBTEMP，40
TBDATA，1，120，30
CYL4，，，5，0，20，90                                 ！生成圆环面
/PNUM，LINE，1                                         ！显示线段编号
LSEL，S，，，1，3，2                                   ！选择线段
LESIZE，ALL，，，10                                    ！设置线段等分数
LSEL，S，，，2，4，2
LESIZE，ALL，，，16
AMESH，1                                               ！对面进行网格划分
EPLOT                                                  ！显示单元
ALLSEL                                                 ！选择所有实体
SAVE
FINISH

/SOLU                                                  ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                         ！选择求解类型
NLGEOM，ON                                             ！启动大应变选项
TIME，1                                                ！指定计算终止时间
NSUBST，50                                             ！指定迭代子步数
BFUNIF，TEMP，30                                       ！施加均匀温度载荷
LSEL，S，，，2                                         ！选择线段
NSLL，S，1                                             ！选择线段上所有节点
D，ALL，UX                                             ！施加位移约束
LSEL，S，，，4
NSLL，S，1
D，ALL，UY
LSEL，S，，，3
NSLL，S，1
SF，ALL，PRES，80                                      ！施加压力载荷
ALLSEL
SOLVE                                                  ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                                 ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST                                              ！读取最终求解结果
```

```
PLDISP，1                                  ！显示变形和未变形形状
PLNSOL，U，SUM                             ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，EQV                             ！绘制等效应力等值线图
NSEL，S，LOC，Y，0
PRNSOL，U，COMP                            ！列表显示节点位移
FINISH
/EXIT，ALL                                 ！退出 ANSYS
```

5.8 材料非线性实例详解——圆盘大应变分析

5.8.1 问题描述

有一个圆盘，其纵截面形状如图 5-128 所示，圆盘由弹塑性材料构成，在其顶面承受均布压力载荷 P 的作用，求圆盘的应力和位移响应。

几何参数：

半径 R=10mm；高度 H=5mm

载荷：

P=3MPa

材料参数：

弹性模量 E=2500MPa；泊松比ν=0.35

屈服强度σ_s=1.5MPa；剪切模量 E_T=3.6MPa

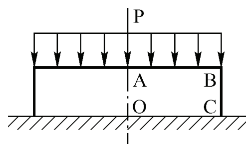


图 5-128　圆盘纵截面结构示意图

5.8.2 问题分析

根据轴对称性，选取圆盘纵截面的 1/2 建立几何模型，并选择 PLANE182 单元进行求解。

提示：建模时长度单位选择 mm，应力单位采用 MPa。

5.8.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE7，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 LARGE STRAIN ANALYSIS OF A DISK，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，4node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉菜单中选择 Axisymmetric，其余选项采用默认设置，如图 5-129 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

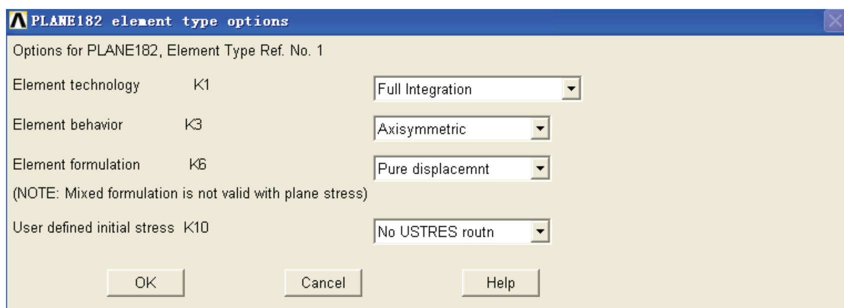


图 5-129 PLANE182 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2500，在 PRXY 输入栏中输入 0.35，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Nonlinear、Inelastic、Rate Independent、Isotropic Hardening Plasticity、Mises Plasticity、Bilinear 选项，出现 Bilinear Isotropic Hardening for Material Number 1 对话框，参照图 5-130 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

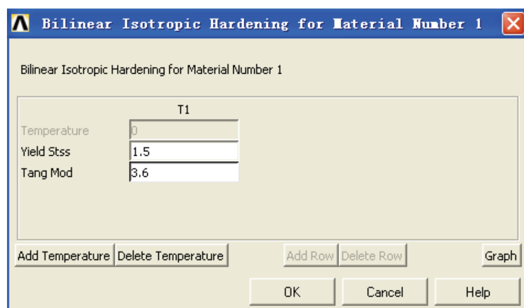


图 5-130 输入材料屈服强度和剪切模量对话框

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Reverse Video 命令，设置显示颜色。

提示：将 ANSYS 显示窗口颜色设置为白色。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、10，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、5，如图 5-131 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

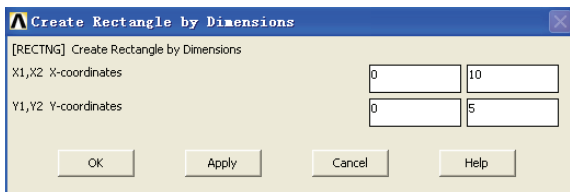


图 5-131　生成矩形面对话框

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE　Line numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段编号。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 20，如图 5-132 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

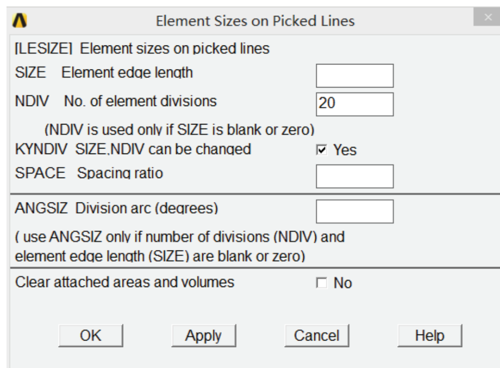


图 5-132　单元尺寸设置对话框

提示：将线段 L1、L3 划分为 20 等份。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu｜Plot｜Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 5-133 所示。

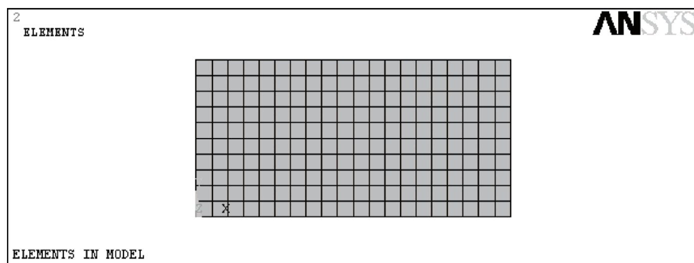


图 5-133　网格划分结果显示

8）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

9）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu｜Solution｜Analysis Type｜Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-134 对其进行设置，单击 Nonlinear 选项卡，参照图 5-135 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

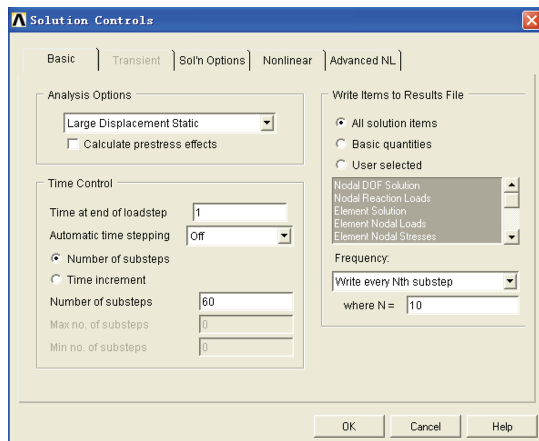


图 5-134　求解控制基本选项设置对话框

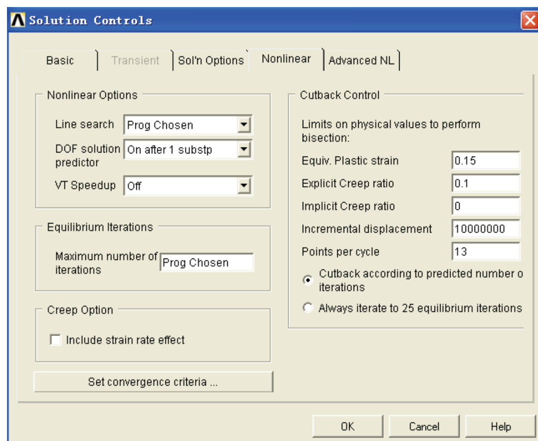


图 5-135　求解控制非线性选项设置对话框

3）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

4）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步的操作目的是选择编号为 L3 的线段上的所有节点，即圆盘上端面上的节点。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Couping/Ceqn | Couple DOFs 命令，出现 Define Coupled DOFs 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Define Coupled DOFs 对话框，在 NSET Set reference number 输入栏中输入 1，在 Lab Degree-of-freedom label 下拉菜单中选择 UY，如图 5-136 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



图 5-136 耦合位移对话框

提示：将圆盘上端面上的节点的 Y 方向的位移进行耦合，即在 Y 方向，这些节点只能平动。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on Nodes 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加压力载荷。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步的操作目的是选择编号为 L4 的线段上的所有节点，即圆盘对称轴线上的节点。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加 X 方向的位移约束，即轴对称位移约束。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，出现 Select lines 拾取菜单，

在输入栏中能输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步的操作目的是选择编号为 L1 的线段上的所有节点，即圆盘下端面上的节点。

12）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加位移约束，即将圆盘的下端面固定。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

14）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。计算过程中，时间跟踪图如图 5-137 所示。

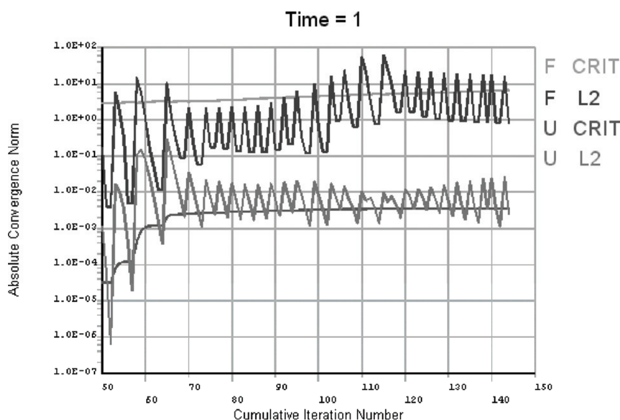


图 5-137 计算过程中时间跟踪图

15）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE7-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取最后一步的求解结果。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示变形后的形状，如图 5-138 所示。



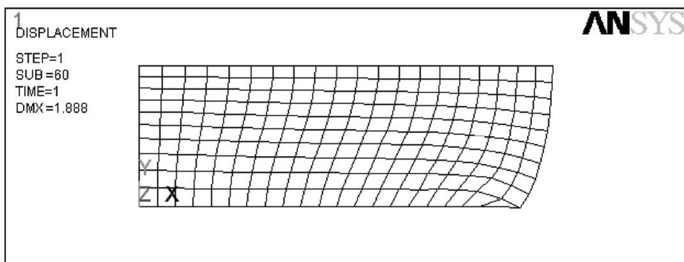


图 5-138　变形几何形状显示

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-139 所示的 X 方向位移等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-140 所示的 Y 方向位移等值线图。

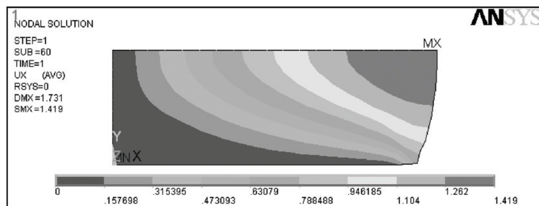


图 5-139　X 方向位移等值线图

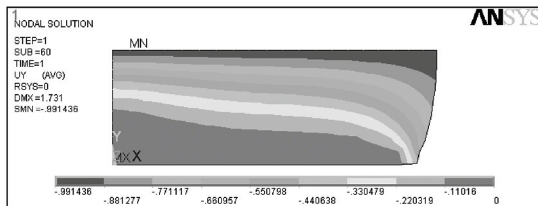


图 5-140　Y 方向位移等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-141 所示的合位移等值线图。

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-142 所示的 X 方向应力等值线图。

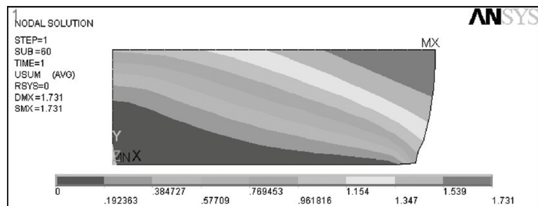


图 5-141　合位移等值线图

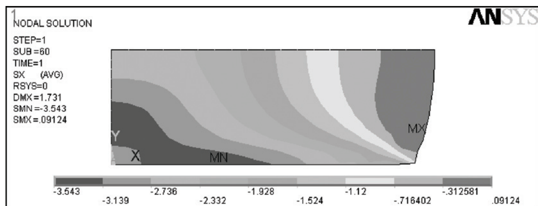


图 5-142　X 方向应力等值线图

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-143 所示的 Y 方向应力等值线图。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-144 所示的等效应力等值线图。

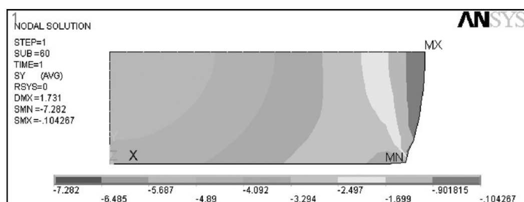


图 5-143　Y 方向应力等值线图

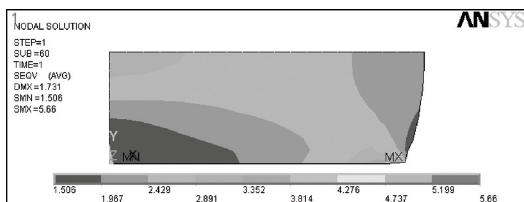


图 5-144　等效应力等值线图

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 5，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，ANSYS 显示窗口将显示圆盘上端面所有节点的位移结果，如图 5-145 所示。

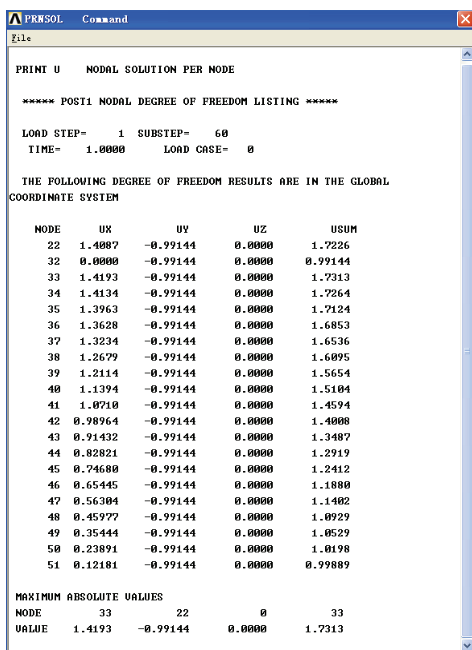
11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab　Item to be listed 列表框中选择 All struc forc F，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示圆盘下端面所有节点的反作用力结果，如图 5-146 所示。

13）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

14）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 NC1=NODE（0，5，0），单击 Accept 按钮，在 Selection 输入栏中输入 NC2=NODE（20，5，0），单击 Close 按钮关闭该对话框。

注意：以下操作均在 POST26 后处理器中进行。



PRNSOL Command

File

PRINT U NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 60
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

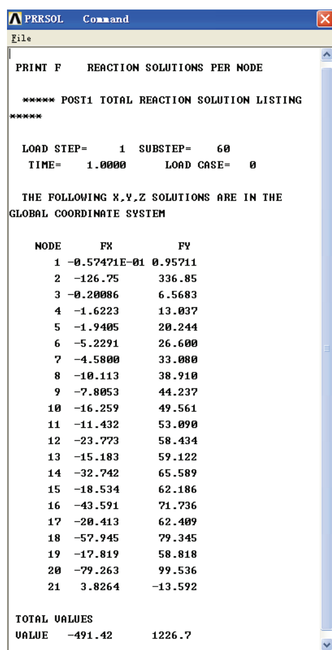
THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	UX	UY	UZ	USUM
22	1.4087	-0.99144	0.0000	1.7226
32	0.0000	-0.99144	0.0000	0.99144
33	1.4193	-0.99144	0.0000	1.7313
34	1.4134	-0.99144	0.0000	1.7264
35	1.3963	-0.99144	0.0000	1.7124
36	1.3628	-0.99144	0.0000	1.6853
37	1.3234	-0.99144	0.0000	1.6536
38	1.2679	-0.99144	0.0000	1.6095
39	1.2114	-0.99144	0.0000	1.5654
40	1.1394	-0.99144	0.0000	1.5104
41	1.0710	-0.99144	0.0000	1.4594
42	0.98964	-0.99144	0.0000	1.4008
43	0.91432	-0.99144	0.0000	1.3487
44	0.82821	-0.99144	0.0000	1.2919
45	0.74680	-0.99144	0.0000	1.2412
46	0.65445	-0.99144	0.0000	1.1880
47	0.56304	-0.99144	0.0000	1.1402
48	0.45977	-0.99144	0.0000	1.0929
49	0.35444	-0.99144	0.0000	1.0529
50	0.23891	-0.99144	0.0000	1.0198
51	0.12181	-0.99144	0.0000	0.99889

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES

NODE	33	22	0	33
VALUE	1.4193	-0.99144	0.0000	1.7313

图 5-145　圆盘上端面节点位移结果显示



PRRSOL Command

File

PRINT F REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 60
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	FX	FY
1	-0.57471E-01	0.95711
2	-126.75	336.85
3	-0.20086	6.5683
4	-1.6223	13.037
5	-1.9405	20.244
6	-5.2291	26.600
7	-4.5800	33.080
8	-10.113	38.910
9	-7.8053	44.237
10	-16.259	49.561
11	-11.432	53.090
12	-23.773	58.434
13	-15.183	59.122
14	-32.742	65.589
15	-18.534	62.186
16	-43.591	71.736
17	-20.413	62.409
18	-57.945	79.345
19	-17.819	58.818
20	-79.263	99.536
21	3.8264	-13.592

TOTAL VALUES

VALUE	-491.42	1226.7

图 5-146　圆盘下端面节点反作用力结果显示

15）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NC1，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 5-147 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

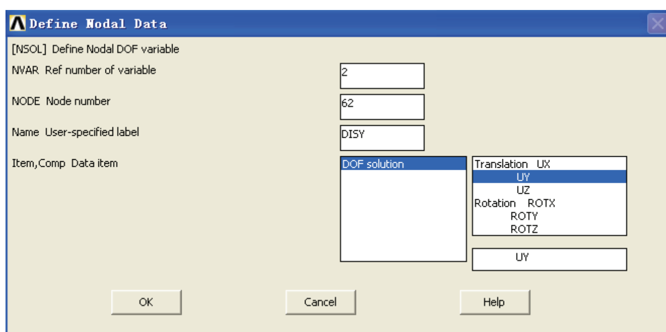


图 5-147　定义节点信息对话框

16）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NC2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 Name User-specified label 输入栏中输入 DISX，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UX，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Math Operations | Multiply 命令，出现 Multiply Time-History Variables 对话框，参照图 5-148 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

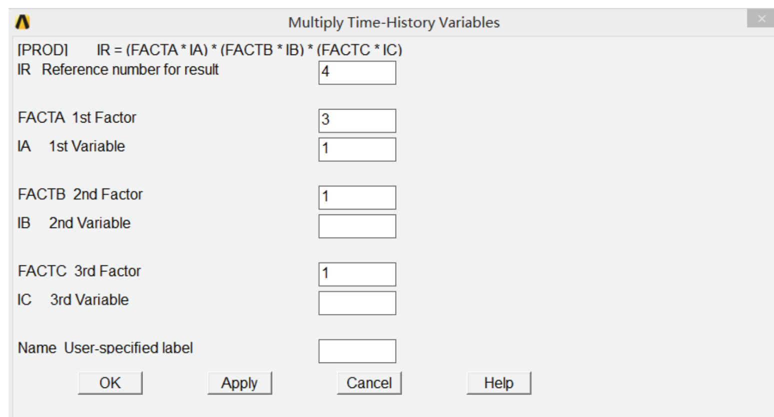


图 5-148 多层时间-历程变量对话框

提示：此操作将时间变量 1 乘以 3，转变为压力变量 4。这是由于先前在求解器中设置的求解时间为 1，而且关闭了 ANSYS 的自动时间步长，表明求解过程中求解时间和压力是一一对应的。

19）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Setting | Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在［XVAR］ X-axis variable 选项中选择 Single variable，在 Single variable no.输入栏中输入 4，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将曲线图的 X 坐标轴设置为压力。

20）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］ X-axis label 输入栏中输入 PRESSURE（MPa），在［/AYLAB］Y-axis label 输入栏中输入 VERTICAL DISPLACE- MENT（mm），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：定义曲线图的 X、Y 坐标轴标题。

21）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 A 点竖直位移同压力的变化关系曲线，如图 5-149 所示。

22）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AYLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 HORIZONTAL DISPLACEMENT（mm），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 B 点水平位移同压力的变化关系曲线，如图 5-150 所示。

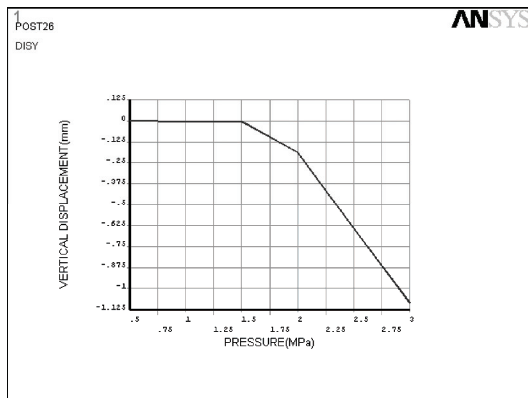


图 5-149　A 点竖直位移随压力的变化关系曲线

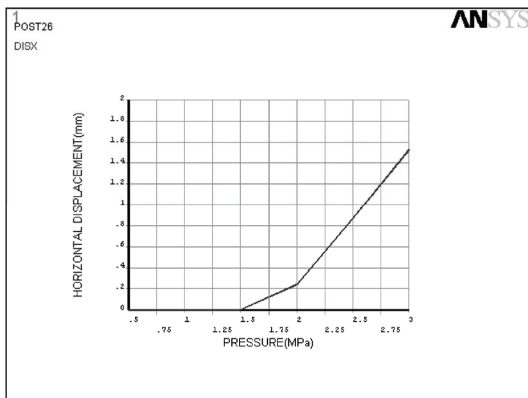


图 5-150　B 点水平位移随压力的变化关系曲线

24）选择 Utility Menu｜File｜Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：如果考虑圆盘下端面和支撑面的摩擦作用，试建模并求解。读者可参考 5.10 节和 5.12 节内容。

5.8.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE7                          ！定义工作文件名
/TITLE，LARGE STRAIN ANALYSIS OF A DISK      ！定义工作标题

/PREP7                                       ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                              ！定义单元类型
KEYOPT，1，3，1                              ！定义单元关键字
MP，EX，1，2500                              ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.35                            ！输入泊松比
TB，BISO，1，1，2
TBDATA，，1.5，3.6                           ！输入屈服强度和剪切模量
RECTNG，0，10，0，5                          ！创建矩形面
/PNUM，LINE，1                               ！显示线段编号
LSEL，S，，，1，3，2                         ！选择线段
LESIZE，ALL，，，20                          ！设置单元等分数
LSEL，S，，，2，4，2
LESIZE，ALL，，，10
AMESH，ALL                                   ！对面进行网格划分
EPLOT                                        ！显示单元
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU                                        ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                               ！选择求解类型
NLGEOM，ON                                   ！启动大应变选项
PRED，ON                                     ！打开预测器选项
TIME，1                                      ！设置迭代终止时间
```



```
AUTOTS，0                                        ！打开自动时间步长选项
NSUBST，60                                       ！设置迭代子步数
OUTRES，ALL，10                                  ！存储求解结果选项设置
LSEL，S,,，3
NSLL，S，1
CP，1，UY，ALL
SF，ALL，PRES，3                                 ！施加压力载荷
LSEL，S,,，4                                     ！选择线段
NSLL，S，1
D，ALL，UX，0                                    ！施加位移约束
LSEL，S,,，1
NSLL，S，1
D，ALL，ALL
ALLSEL                                           ！选择所有实体
SOLVE                                            ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                           ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST                                        ！读取最终求解结果
PLDISP，0                                        ！显示变形形状
PLNSOL，U，X                                     ！绘制 X 方向位移等值线图
PLNSOL，U，Y                                     ！绘制 Y 方向位移等值线图
PLNSOL，U，SUM                                   ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，X                                     ！绘制 X 方向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                                     ！绘制 Y 方向应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                                   ！绘制等效应力等值线图
NSEL，S，LOC，Y，5
PRNSOL，U，COMP                                  ！列表显示节点位移
NSEL，S，LOC，Y，0
PRRSOL，F                                        ！显示支反力
ALLSEL
FINISH

/POST26                                          ！进入 POST26 后处理器
NC1=NODE(0，5，0)                                ！根据节点坐标获取节点编号
NC2=NODE(20，5，0)
NSOL，2，NC1，U，Y，DISY                         ！定义节点变量
NSOL，3，NC2，U，X，DISX
PROD，4，1,,,,,，3，1，1                         ！变量相乘
XVAR，4                                          ！指定 X 坐标轴变量
/AXLAB，X，PRESSURE(MPa)                         ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，VERTICAL DISPLACEMENT(mm)             ！指定 Y 坐标轴标题
PLVAR，2                                         ！曲线显示变量
/AXLAB，Y，HORIZONTAL DISPLACEMENT(mm)
PLVAR，3
FINISH
/EXIT，ALL                                       ！退出 ANSYS
```

5.9 材料非线性实例详解——铁桩插入土壤分析

5.9.1 问题描述

图 5-151 所示为一根圆柱铁桩插入土壤之中，在铁桩的上端受到垂直向下的载荷，试分析此时铁桩对土壤的影响（图示长度单位为 mm）。

铁桩材料参数：

弹性模量 EX_1=220GPa；泊松比 $PRXY_1$=0.3

土壤材料参数：

弹性模量 EX_2=5GPa；泊松比 $PRXY_2$=0.4；粘聚力 C=10MPa；内摩擦角ϕ=30；膨胀角ϕ_f=30

载荷：

P=500MPa

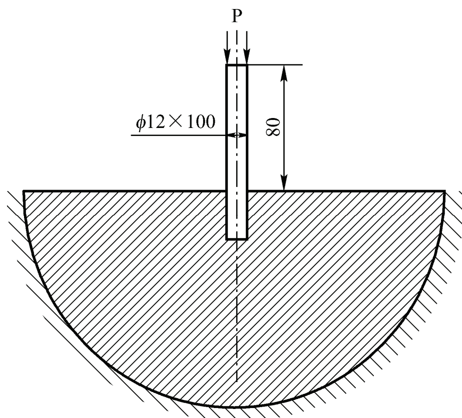


图 5-151 铁桩插入土壤示意图

提示：在建模过程中，长度单位采用 mm，压力单位采用 MPa。

5.9.2 问题分析

该问题属于材料非线性问题。由于土壤趋于无限大，在进行有限元分析时可以取相对于铁桩来说足够大的半圆形区域作为研究对象，该区域与外界土壤的联系可以通过弹簧单元来模拟。选用 DP 材料模型描述土壤的应力应变关系。

5.9.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框。在输入栏中输入工作文件名 EXERCISE8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 STEEL BAR INSERTED IN SOIL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）在 Utility Menu 的输入栏中输入“ET, 1, PLANE42,,,2”，单击键盘上的〈Enter〉键确认。

提示：由于在 ANSYS 16.1 中，PLANE42 单元已不再建议使用，因此无法在单元列表中进行选择，但可以通过命令操作的方式直接输入。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框。单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Combination，Spring-damper 14，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Element Types 对话框中选择 COMBIN14 单元，单击 Options 按钮，出现 COMBIN14 element type options 对话框，在 DOF selection for 2D+3D　K3 下拉选框中选择 2-D longitudinal，如图 5-152 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

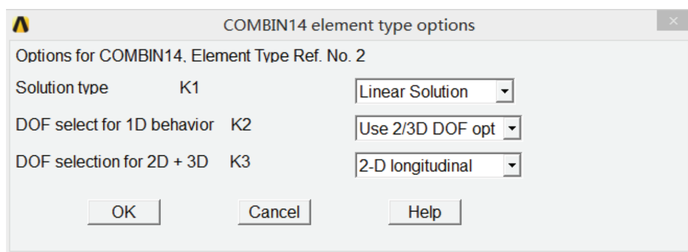


图 5-152　COMBIN14 单元属性设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 COMBIN14，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for COMBIN14 对话框，在 Spring constant　K 输入栏中输入 3.1416*5000/19，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Close 按钮关闭 Real Constants 对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Availabler 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 5000，在 PRXY 输入栏中输入 0.4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Nonlinear、Inelastic、Non-metal Plasticity、Drucker-Prager 选项，出现 Drucker Prager for Material Number 1 对话框，参照图 5-153 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入-6，6，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入-20，80，如图 5-154 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

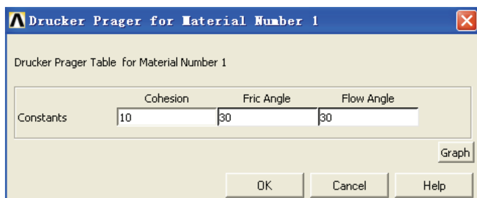


图 5-153　输入 DP 材料参数对话框

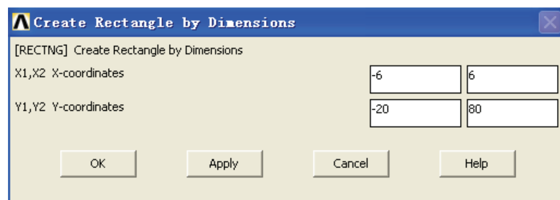


图 5-154　创建矩形面对话框

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | By Dimensions 命令，出现 Circular Area by Dimensions 对话框，在 RAD1　Outer radius 输入栏中输入 0，在 RAD2　Optional inner radius 输入栏中输入 180，在 THETA1　Starting angle（degrees）输入栏中输入-180，在 THETA2　Ending　angle（degrees）输入栏中输入 0，如图 5-155 所示，单击 Apply 按钮；在 RAD2　Optional inner radius 输入栏中输入 60，在 THETA1　Starting angle（degrees）输入栏中输入-180，单击 OK 按钮关闭该对话框。

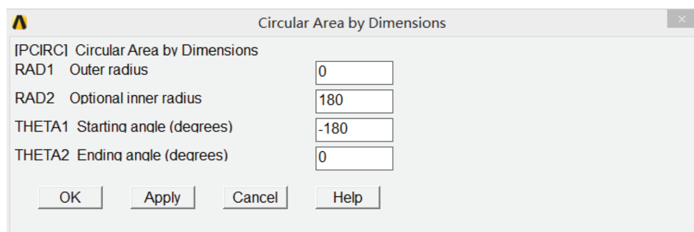


图 5-155　创建圆面对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Areas 命令，出现 Overlap Areas 菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

提示：进行面的叠合操作。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label　Item to be compressed 下拉选框中选择 All，如图 5-156 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

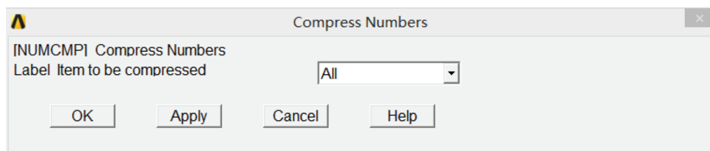


图 5-156　压缩实体编号对话框

提示：压缩所有实体的编号，如线段编号为 L1、L2、L4、L5、L7，则执行此操作后被压缩为 L1、L2、L3、L4、L5。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 3，4，单击 OK 按钮，出现

Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 24，如图 5-157 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

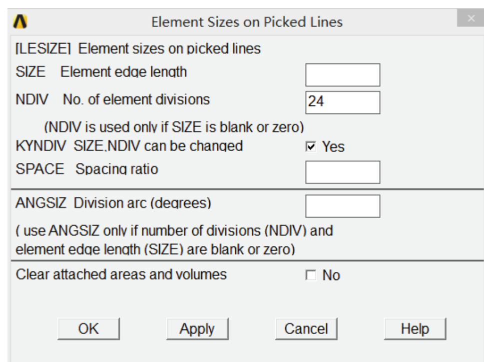


图 5-157 设置线段单元尺寸对话框

提示：将线段 L3、L4 划分为 24 等份。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 5，6，11，12，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Add | Lines 命令，出现 Add Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 9，10，单击 OK 按钮，出现 Add Lines 对话框，在 KEEP Existing lines will be 下拉选框中选择 Deleted，如图 5-158 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

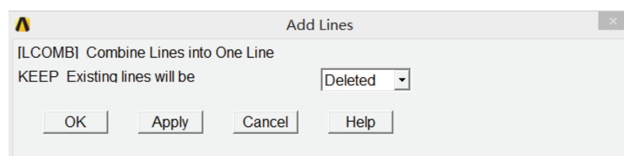


图 5-158 线段相加操作属性设置对话框

提示：进行线段的相加操作。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 1，2，7，8，9，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 13，14，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 16，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 2，3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | Concatenate | Lines 命令，出现 Concatenate Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，7，8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前坐标系变换为柱坐标系。

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，参照图 5-159 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以下操作将在局部坐标系中进行。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy 命令，出现 Copy Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1001，单击 OK 按钮，出现 Copy nodes 对话框，参照图 5-160 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

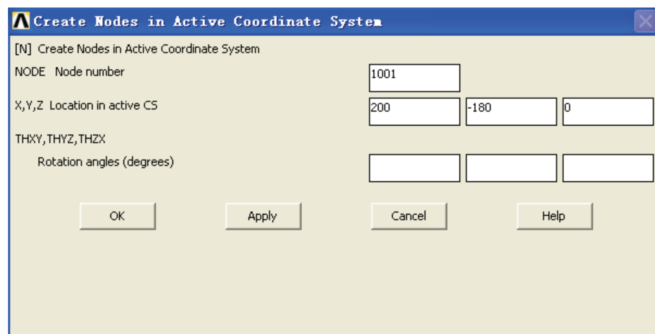


图 5-159 创建节点对话框

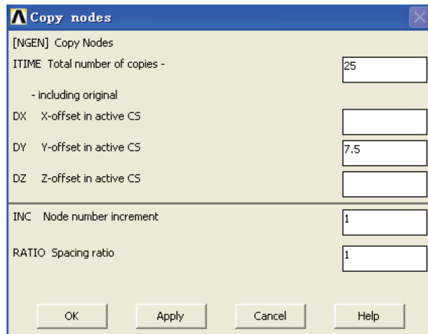


图 5-160 复制节点对话框

20）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Elements Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 2

COMBIN14，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Elements｜Auto Numbered｜Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，1001，单击 Apply 按钮。

22）重复上一步的操作过程，两个节点生成一个单元，分别由以下节点对生成相应的单元：

（3，1002）；（4，1003）；（5，1004）；（6，1005）；（7，1006）；
（8，1007）；（9，1008）；（10，1009）；（11，1010）；（12，1011）；
（13，1012）；（14，1013）；（15，1014）；（16，1015）；（17，1016）；
（18，1017）；（19，1018）；（20，1019）；（21，1020）；（22，1021）；
（23，1022）；（24，1023）；（25，1024）；（26，1025）。

技巧：该操作可通过在命令栏中输入以下命令实现：

```
*DO，I，3，25
E，I，1000+I-1
*ENDDO
E，2，1025
```

23）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X Coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 180，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 180 的所有节点，因为在柱坐标系中，所以此时的 X 坐标即 r 坐标。

24）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Copy｜Nodes｜Copy 命令，出现 Copy Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Nodes 对话框，在 ITIME Total number of copies 输入栏中输入 2，在 DX X-offset in active CS 输入栏中输入 180*（2*1.732-3）/3，在 DY Y-offset in active CS 输入栏中输入 30，在 INC Node number increment 输入栏中输入 1100，单击 OK 按钮关闭该对话框。

25）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Elements｜Auto Numbered｜Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，1101，单击 Apply 按钮。

26）重复上一步的操作过程，两个节点生成一个单元，分别由以下节点对生成相应的单元：

（2，1102）；（3，1103）；（4，1104）；（5，1105）；（6，1106）；
（7，1107）；（8，1108）；（9，1109）；（10，1110）；（11，1111）；
（12，1112）；（13，1113）；（14，1114）；（15，1115）；（16，1116）；
（17，1117）；（18，1118）；（19，1119）；（20，1120）；（21，1121）；
（22，1122）；（23，1123）；（24，1124）；（25，1125）。

技巧：该操作可通过在命令栏中输入以下命令实现：

```
*DO，I，1，25
E，I，1100+I
*ENDDO
```

27）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

28）选择 Utility Menu | Plot | Element 命令，ANSYS 显示窗口显示生成的有限元模型，如图 5-161 所示。

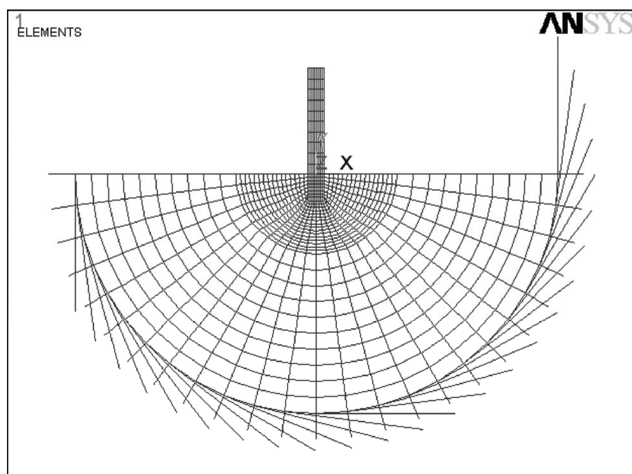


图 5-161　生成的有限元模型结果显示

29）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE8-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 200，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在 Min,Max 输入栏中输入 180*（2*1.732）/3，在第 5 栏中选择 Also Select，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 200 和 180*（2*1.732）/3 的所有节点，即所有弹簧单元的外节点。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加位移约束。

4）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

5）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系变换为直角坐标系。

提示：以下操作将在直角坐标系中进行。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 80，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标值为 80 的所有节点，即铁桩上端面上的节点。

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on Nodes 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 500，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加压力载荷。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

9）选择 Utility Menu | Plot | Element 命令，ANSYS 显示窗口显示施加约束及载荷后的有限元模型，如图 5-162 所示。

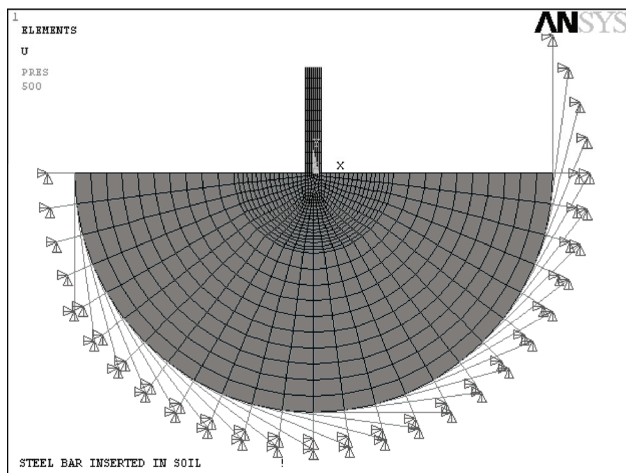


图 5-162 加载后的有限元模型

10）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol's Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击其上的 Baisc 选项卡，参照图 5-163 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol's Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击其上的 Nonlinear 选项卡，参照图 5-164 对其进行设置。

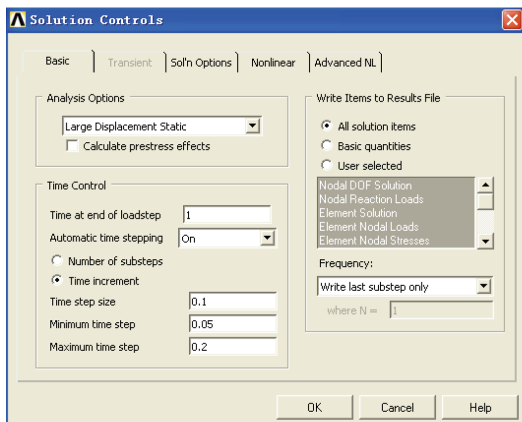


图 5-163　求解过程基本属性设置对话框

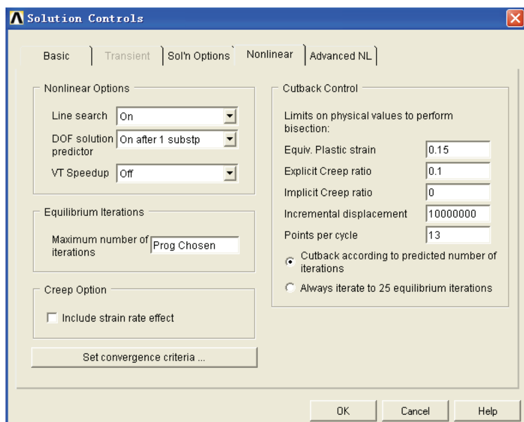


图 5-164　非线性属性设置对话框

12）单击 Set convergence criteria 按钮，出现 Nonlinear Convergence Criteria 对话框，单击其上的 Edit 按钮，出现 Nonlinear Convergence Criteria 对话框，参照图 5-165 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。单击 Solution Controls 对话框上的 OK 按钮关闭该对话框。

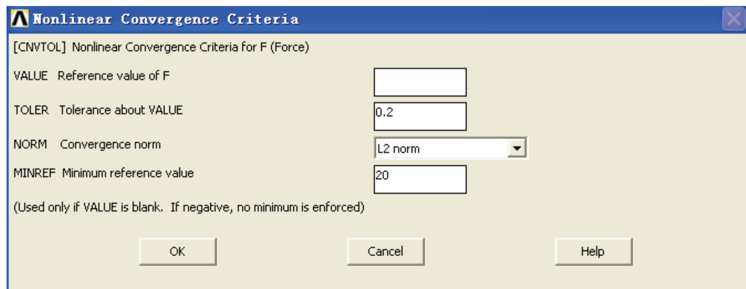


图 5-165　非线性收敛标准对话框

13）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框上的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

14）求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE8-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 X 方向位移等值线图，如图 5-166 所示。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出

现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜DOF Solution｜Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向位移等值线图，如图 5-167 所示。

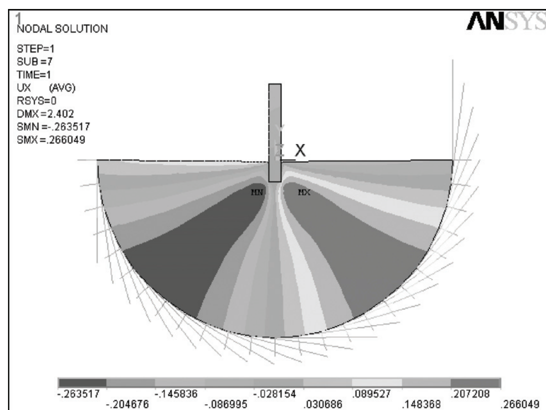


图 5-166　X 方向位移等值线图

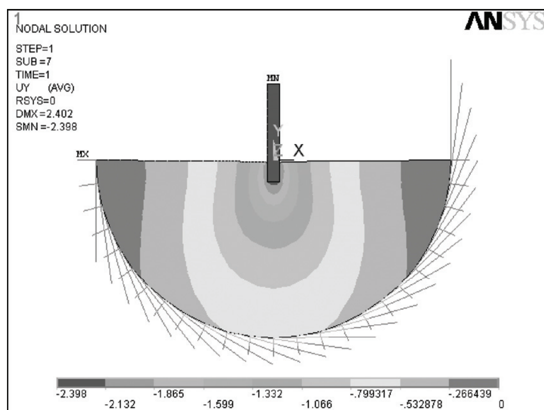


图 5-167　Y 方向位移等值线图

4）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜Stress｜X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 X 方向应力等值线图，如图 5-168 所示。

5）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜Stress｜Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向应力等值线图，如图 5-169 所示。

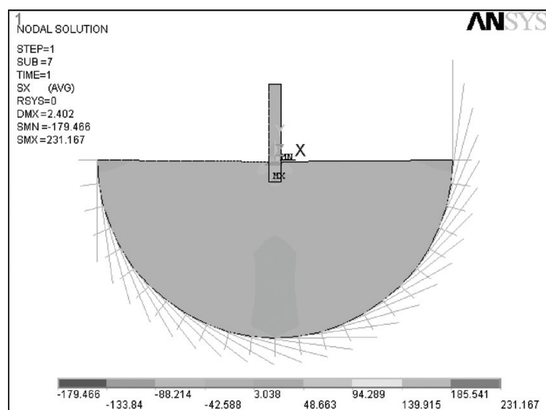


图 5-168　X 方向应力等值线图

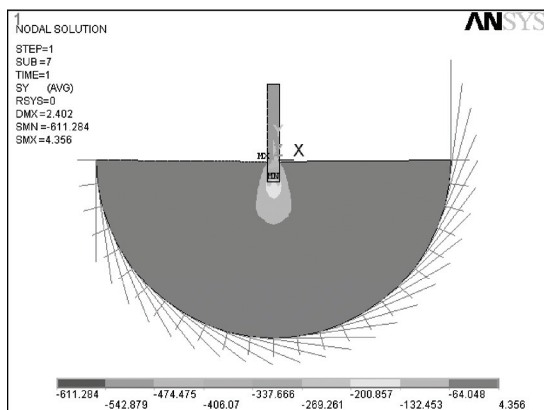


图 5-169　Y 方向应力等值线图

6）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜Stress｜XY Shear stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示剪应力等值线图，如图 5-170 所示。

7）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜Stress｜von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力等值线图，如图 5-171 所示。



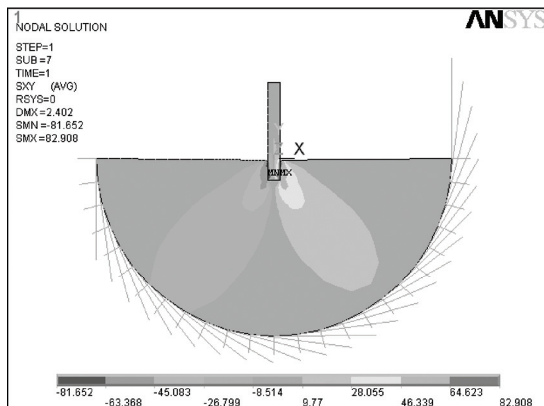


图 5-170　剪应力等值线图

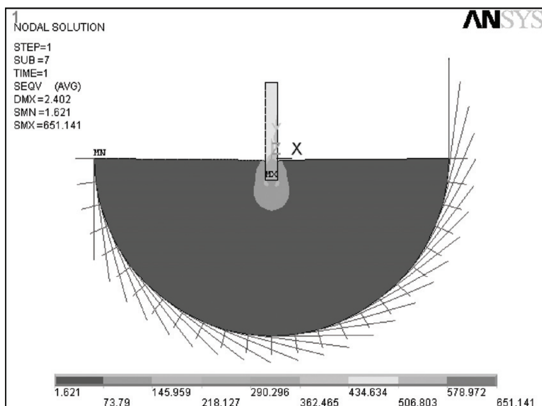


图 5-171　等效应力等值线图

8）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

试一试： 增加描述土壤的半圆面的半径，以本例的求解思路进行建模和求解，比较求解结果的差别；读者也可以尝试运用 PLANE182 单元替代 PLANE42 单元进行求解，但要注意相应的单元属性设置。

5.9.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE8                      ！定义工作文件名
/TITLE，STEEL BAR INSERTED IN SOIL       ！定义工作标题
/PREP7                                   ！进入前处理器
ET，1，PLANE42                           ！定义单元类型
ET，2，COMBIN14
KEYOPT，1，3，2                          ！定义单元关键字
KEYOPT，2，3，2
R，1，3.1416*5000/19                     ！定义单元实常数
MP，EX，1，5000                          ！输入材料弹性模量
MP，PRXY，1，0.4                         ！输入材料泊松比
TB，DP，1                                ！输入 DP 材料性能参数
TBDATA，1，10，30，30
MP，EX，2，2.2E5
MP，PRXY，2，0.3
RECTNG，-6，6，-20，80                   ！生成矩形面
PCIRC，，180，-180，0                    ！生成半圆面
PCIRC，，60，-180，0
AOVL，ALL                                ！面的叠合操作
NUMCMP，ALL                              ！压缩编号
LPLOT                                    ！显示线段
LSEL，S，，，3，4                        ！选择线段
LESIZE，ALL，，，24                      ！设置线段等分数
LSEL，S，，，5，6
LSEL，A，，，11，12
LESIZE，ALL，，，10
```



```
LSEL，S，，，9，10
LCOM，ALL                                ! 将所选线段合并为 1 条线段
LSEL，S，，，1，2
LSEL，A，，，7，9
LESIZE，ALL，，，8
LSEL，S，，，13，14
LESIZE，ALL，，，16
ALLSEL
MAT，1
AMESH，1                                 ! 对面进行网格划分
MAT，2
ASEL，S，，，2，3                          ! 选择面
AMESH，ALL
ALLSEL
MAT，1
LSEL，S，，，1                            ! 选择线段
LSEL，A，，，7，8
LCCAT，ALL                               ! 将所选线段连接为 1 条线段
ALLSEL
AMESH，4
CSYS，1                                  ! 将当前坐标系转变为柱坐标系
N，1001，200，-180                        ! 创建节点
NGEN，25，1，1001，，，，7.5                ! 生成节点
TYPE，2                                  ! 指定单元类型
REAL，1
MAT，1
E，1，1001                               ! 由节点生成单元
*DO，I，3，25                             ! 进入循环
E，I，1000+I-1                            ! 由节点生成单元
*ENDDO                                   ! 结束循环
E，2，1025
NSEL，S，LOC，X，180
NGEN，2，1100，ALL，，，180*(2*1.732-3)/3，30
*DO，I，1，25
E，I，1100+I
*ENDDO
ALLSEL
EPLOT
FINISH

/SOLU                                    ! 进入求解器
ANTYPE，STATIC
NSEL，S，LOC，X，200                      ! 选择节点
NSEL，A，LOC，X，180*(2*1.732)/3
D，ALL，ALL                               ! 施加位移约束
ALLSEL
CSYS，0                                  ! 将当前坐标系转变为平面直角坐标系
NSEL，S，LOC，Y，80
SF，ALL，PRES，500                        ! 在节点上施加压应力
ALLSEL
```

```
TIME，1                                    ！设置迭代终止时间
DELTIM，0.1，0.05，0.2                     ！设置时间步长
AUTOT，ON                                  ！打开自动时间步长选项
CNVTOL，F，，0.2，，20                     ！设置非线性收敛标准
NLGEOM，ON                                 ！启动大应变选项
PRED，ON                                   ！打开预测器选项
LNSRCH，ON                                 ！激活线搜索选项
SOLVE                                      ！开始求解
SAVE
FINISH

/POST1                                     ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST                                  ！读取最后求解结果
PLNSOL，U，X                               ！绘制 X 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，Y                               ！绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，S，X                               ！绘制 X 方向应力场等值线图
PLNSOL，S，Y                               ！绘制 Y 方向应力场等值线图
PLNSOL，S，XY                              ！绘制 XY 面上的剪应力场等值线图
PLNSOL，S，EQV                             ！绘制等效应力场等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                                 ！退出 ANSYS
```

5.10 状态非线性实例详解——卡头压进卡座的力学过程分析

5.10.1 问题描述

图 5-172 所示为一组弹簧卡头和卡座，假设卡头和卡座的底板是刚性的，试对卡头压进卡座的力学过程进行分析。

材料参数：

弹性模量 E=3600MPa；

泊松比ν=0.32；

摩擦系数μ=0.1

图 5-172 上各点坐标如下：

A（5，40，0）；B（12.7，40，0）；

C（15，48.5，0）；D（10，50，0）；

E（12.5，60，0）；F（5，60，0）；

G（12.5，30，0）；H（10，20，0）；

I（15，18.5，0）；J（10，0，0）；

K（20，0，0）；L（20，30，0）

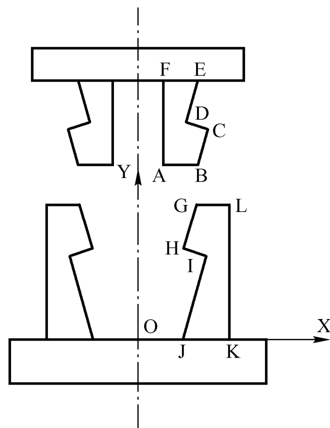


图 5-172 卡头和卡座结构示意图

5.10.2 问题分析

由于卡头和卡座的底板是刚性的，因此在建模过程中不予考虑；根据对称性，选取卡头

和卡座的 1/2 建立几何模型，同时选择 PLANE182 结构单元以及 TARGE169、CONTA171、CONTA172 接触单元进行分析求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE42 结构单元。

5.10.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE9，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 CONTACT ANALYSIS TO A SNAP-FIT CONNECTOR，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Contact　2D 2 nd surf　171，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Element Types 对话框上选择 Type 1 PLANE182，单击 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element behavior　K3 下拉菜单中选择 Plane strs w/thk，其余选项采用默认设置，如图 5-173 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

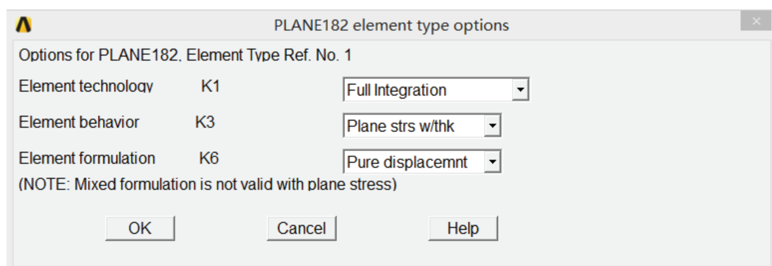


图 5-173　PLANE182 单元属性设置对话框

提示：将单元属性设置为平面应力。

4）在 Element Types 对话框上选择 Type 2 CONTA171，单击 Options 按钮，出现 CONTA171 element type options 对话框，在 Attached Superelement　K3 下拉菜单中选择 Plane strs w/thk，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Element Types 对话框上单击 OK 按钮，关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Real

Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 1 PLANE42，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for PLANE182 对话框，在 Real Constants Set No.输入栏中输入 1，在 Thickness THK 输入栏中输入 5，单击 OK 按关闭该对话框。

7）在 Real Constants 对话框上单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 Type 2 CONTA171，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 2，for CONTA171 对话框，在 Real Constants Set No.输入栏中输入 2，在 Superelement thickness R2 输入栏中输入 5，在 Normal penalty stiffness FKN 输入栏中输入 6000，其余选项采用默认设置，如图 5-174 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

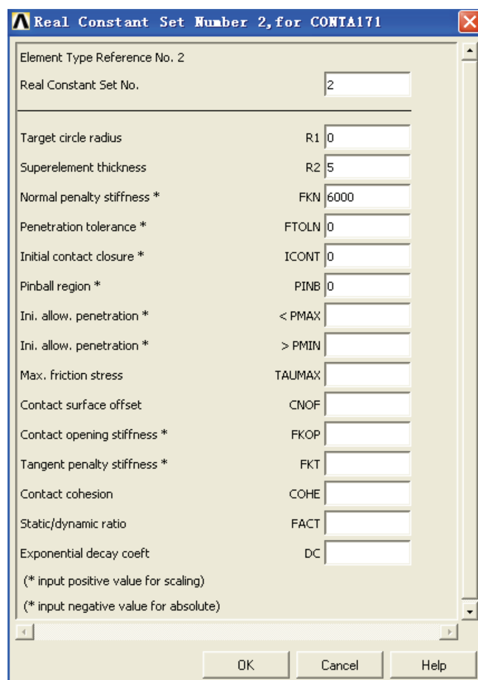


图 5-174 CONTA171 单元实常数设置对话框

8）在 Real Constants 对话框上单击 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3600，在 PRXY 输入栏中输入 0.32，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Friction Coefficient 选项，出现 Friction Coefficient for Material Number 1 对话框，在 MU 输入栏中输入 0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。参照图 5-175 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

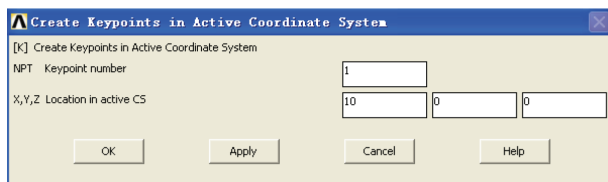


图 5-175 生成关键点对话框

2）参照第 1）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号和坐标：

2（20，0，0）；3（15，18.5，0）；4（10，20，0）；

5（12.5，30，0）；6（20，30，0）

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP Keypoint numbers、LINE Line numbers 和 AREA Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点、线段和面的编号。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择编号为 1、3 的关键点生成第 1 条线段，再依次选择编号为 3、4，4、5，5、6，6、2，2、1 的关键点，分别生成第 2 至第 6 条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：两个关键点连接生成 1 条线段，不同的选择次序将影响生成线段的编号。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create by L 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Lines 命令，出现 Copy Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，3，单击 OK 按钮，出现 Copy Lines 对话框，参照图 5-176 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

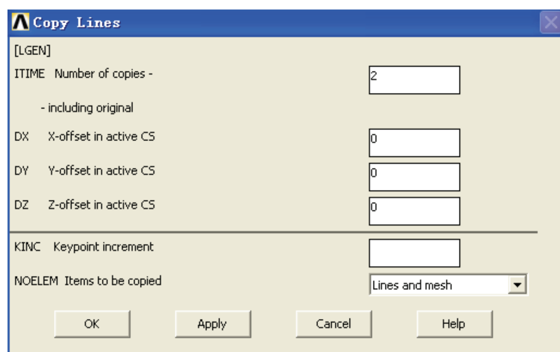


图 5-176 复制线段对话框

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。 在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 11，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 5，0，0，单击 Apply 按钮，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 12，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 5，30，0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口选择编号为 7、11 的关键点生成 1 条线段，再依次选择编号为 11、12，12、10 的关键点，另外生成 2 条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：若出现重叠关键点，可通过弹出的 Multiple_Entities 对话框上的 Prev 或 Next 按钮进行选择。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Areas，在第 4 栏中选择 Unselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择除附属于面上的线段之外的所有其他线段。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create by L 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

11）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0，15，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0，10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas 命令，出现 Subtract Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。图 5-177 是面相减操作后的结果。

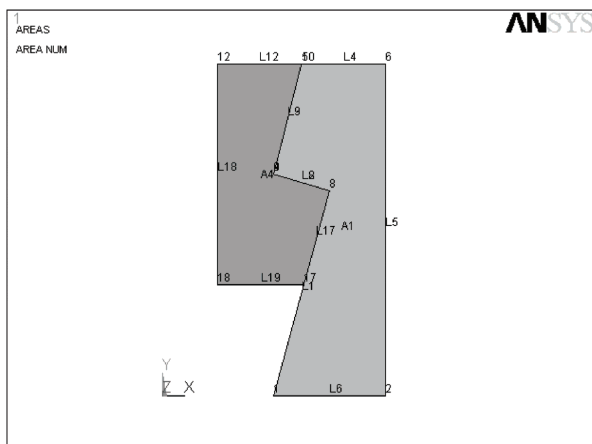


图 5-177 面相减后的结果显示

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Move/Modify | Areas | Areas 命令，出现 Move Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，出现 Move Areas 对话框，在 DY Y-offset in active CS 输入栏中输入 30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：沿 Y 轴正向移动面，移动距离为 30。

15）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩所有实体的编号，如线段编号为 L1、L2、L4、L5、L7，则执行此操作后被压缩为 L1、L2、L3、L4、L5。

17）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，ANSYS 显示窗口将显示如图 5-178 所示的几何模型。

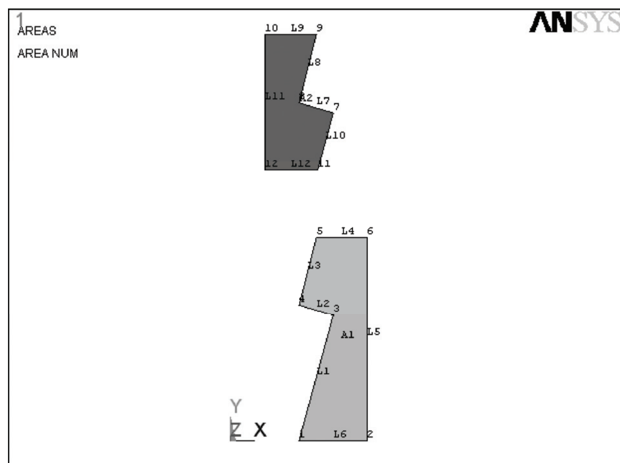


图 5-178 生成的几何模型结果显示

18）参照第 1）步的操作过程，在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号和坐标：

20（5，50，0）；21（20，18.5，0）

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 拾取菜单，在输入栏中输入 20，8，单击 Apply 按钮；在输入栏中输入 3，21，单击 OK 按钮关闭该菜单。

20）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by Line 命令，出现 Divide Area by Line 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 13，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过线段 L13 将面 A2 分为两个平面。

21）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Divide | Area by Line 命令，出现 Divide Area by Line 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入

栏中输入 14，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过线段 L14 将面 A1 分为两个平面，若出现 Warning 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框即可。

22）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，参照图 5-179 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

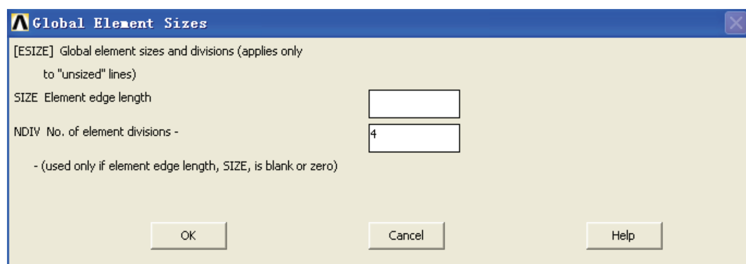


图 5-179 单元等分数设置对话框

24）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | By Corners 命令，出现 Map Mesh Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，在输入栏输入 13，12，11，7，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 4，5，6，14，单击 OK 按钮，单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

提示：对面 A3、A4 进行映射网格划分。

25）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

26）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 4，7，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

27）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，10，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

28）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | By Corners 命令，出现 Map Mesh Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 10，13，8，9，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 1，3，14，2，单击 OK 按钮，单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

29）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，

如图 5-180 所示。

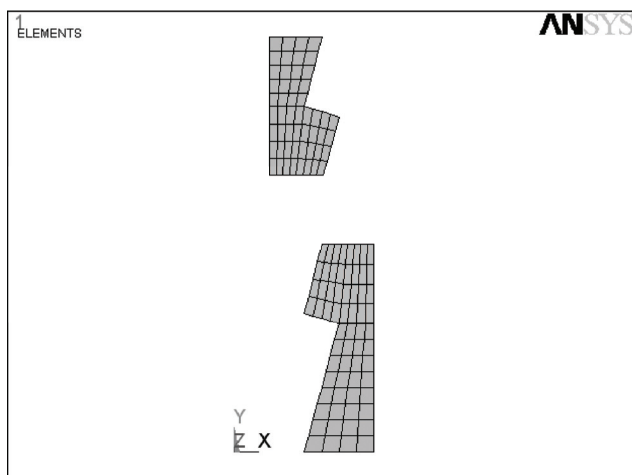


图 5-180　网格划分结果显示

30）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

31）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE9-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．生成接触对

1）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

2）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full。单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 9，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入 SNAP1，在 Entity Component is made of 下拉菜单中选择 Nodes，如图 5-181 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

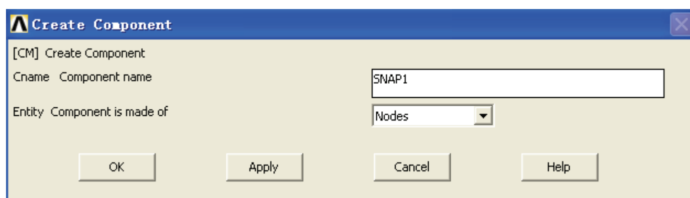


图 5-181　生成组元对话框

提示：以上 3 步操作是选择编号为 L9 的线段上的所有节点，并将其创建为组元 SNAP1。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full。单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入 SNAP2，在 Entity Component is mode of 下拉菜单中选择 Nodes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上 3 步操作是选择编号为 L3 的线段上的所有节点，并将其创建为组元 SNAP2。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full。单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入 PULL1，在 Entity Component is mode of 下拉菜单中选择 Nodes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上 3 步操作是选择编号为 L6 的线段上的所有节点，并将其创建为组元 PULL1。

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full。单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入 PULL2，在 Entity Component is mode of 下拉菜单中选择 Nodes，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上 3 步操作是选择编号为 L2 的线段上的所有节点，并将其创建为组元 PULL2。

14）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

提示：以下操作为创建接触对。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉菜单中选择 2 CONTA171，在［REAL］ Real constant set number 下拉菜单中选择 2，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Contact Pair 命令，出现 Contact Manager 对话框，如图 5-182 所示。

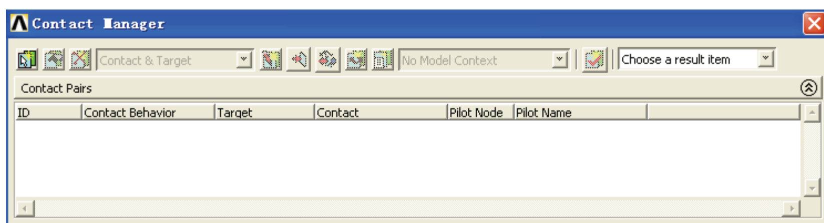


图 5-182　接触管理器对话框

17）单击 Contact Manager 对话框上的 Contact Wizard 按钮（对话框左上角），出现 Contact Wizard 对话框，在 Target Surface 选项中选择 Nodal Component，在下拉菜单中选择 SNAP2，其余选项采用默认设置，如图 5-183 所示。

18）单击 Next 按钮，在 Nodal Component 下拉菜单中选择 SNAP1，在 Contact Element Type 选项中选择 Surface-to-Surface，其余选项采用默认设置，如图 5-184 所示。

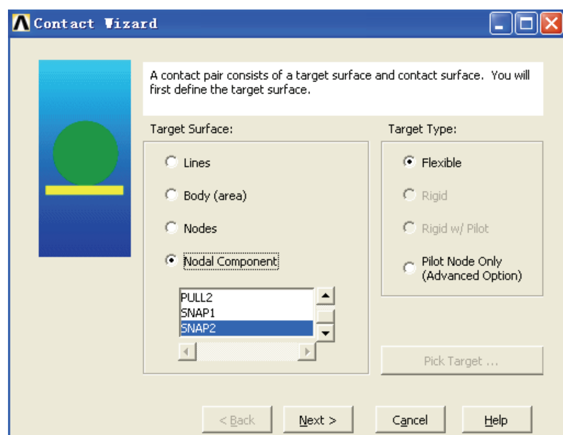


图 5-183　生成目标面对话框

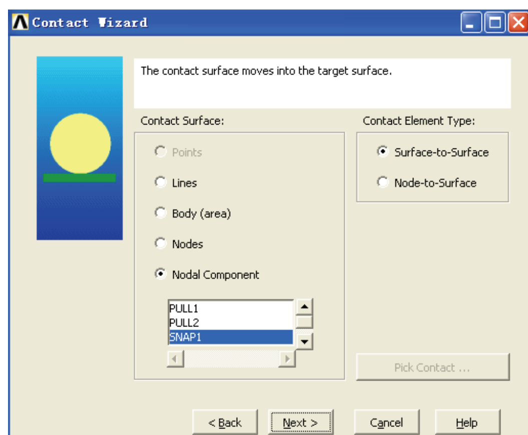


图 5-184　生成接触面对话框

19）单击 Next 按钮，在 Coefficient of Friction 输入栏中输入 0.1，其余选项采用默认设置，如图 5-185 所示。

20）单击 Optional settings 按钮，出现 Contact Properties 对话框，单击其上的 Basic 选项卡，在 Normal Penalty Stiffness 输入栏中输入 0.1，其余选项采用默认设置，如图 5-186 所示。

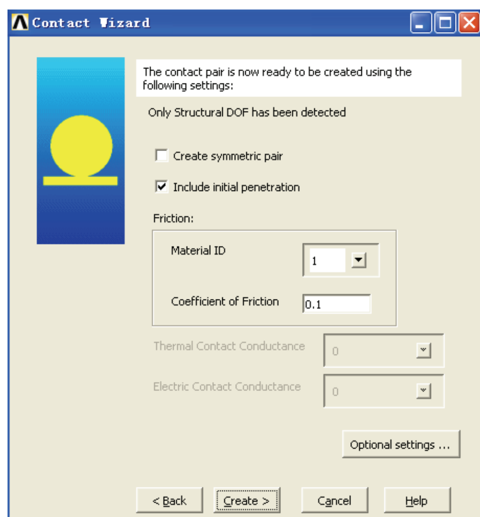


图 5-185　接触对属性设置对话框

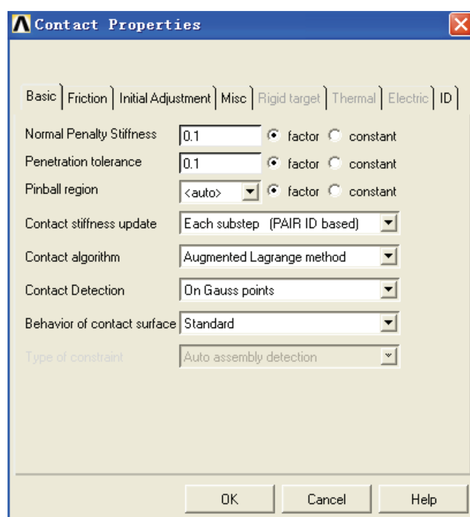


图 5-186　Basic 属性设置对话框

21）单击 Contact Properties 对话框中的 Friction 选项卡，在 Stiffness matrix 下拉菜单中选择 Unsymmetric，其余选项采用默认设置，如图 5-187 所示。

22）单击 Contact Properties 对话框中的 Misc 选项卡，在 Super-element usage 下拉菜单中选择 Plane stress with thickness，在 Element thickness 输入栏中输入 5.0，其余选项采用默认设置，如图 5-188 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

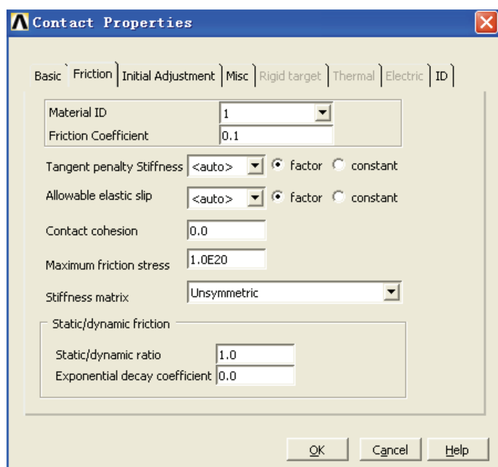


图 5-187　Friction 属性设置对话框

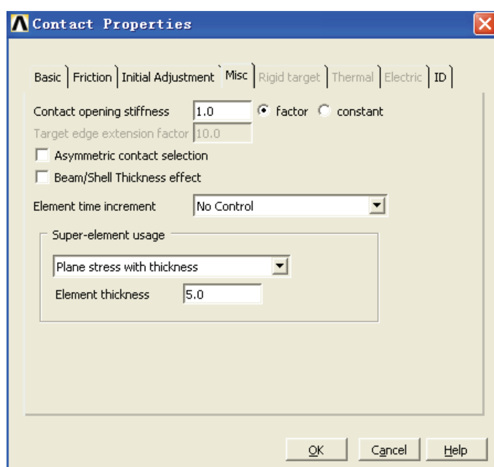


图 5-188　Misc 属性设置对话框

23）单击 Contact Wizard 对话框中的 Create 按钮生成接触对，出现 Contact Wizard 提示框，单击 Finish 按钮关闭该提示框。

24）单击 Contact Manager 对话框中的 Contact Wizard 按钮，出现 Contact Wizard 对话框，在 Nodal Component 下拉菜单中选择 PULL2，其余选项采用默认设置。

25）单击 Next 按钮，在 Nodal Component 下拉菜单中选择 PULL1，在 Contact Element Type 选项中选择 Surface-to-Surface，其余选项采用默认设置。

26）重复第 19）～23）的操作步骤，创建 ID 为 4 的接触对，操作完毕后的 Contact Manager 对话框如图 5-189 所示。

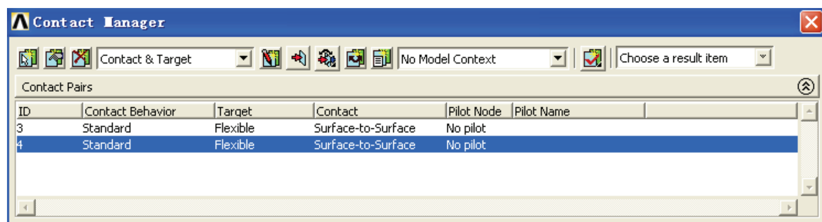


图 5-189　生成接触对结果显示

27）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE9-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击 Basic 选项卡，参照图 5-190 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

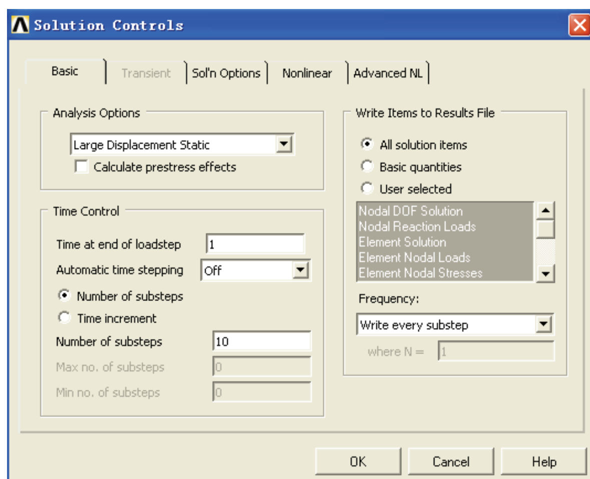


图 5-190　求解控制基本选项设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 Y 坐标为 0 的所有节点，即卡座底面上的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On

Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加位移约束，即将卡座底面固定。

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 60，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 Y 坐标为 60 的所有节点，即卡头顶面上的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 Apply 按钮，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入-30，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加位移载荷，即卡头顶面上的所有节点不允许 X 方向的位移，沿 Y 轴向下移动 30。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Coupling/Ceqn | Couple DOFs 命令，出现 Define Coupled DOFs 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Define Coupled DOFs 对话框，在 NSET Setreference number 输入栏中输入 1，在 Lab Degree-of-freedom label 下拉菜单中选择 UY，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：耦合所选节点的 Y 方向位移，即只允许卡头顶面上节点 Y 方向的平动。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

9）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 将开始求解计算。

10）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

11）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE9-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step 命令，出现 Read Results by Load Step Number 对话框，在 SBSTEP Substep number 输入栏中输入 4，如图 5-191 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

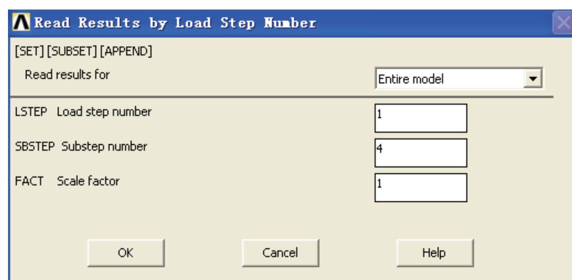


图 5-191 按载荷步读取求解结果对话框

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，在 KUND Items to be plotted 选项中选择 Def shape only 选项，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示第 4 个载荷子步后的变形形状，如图 5-192a 所示。

3）参照第 1）和 2）步的操作过程，分别读取第 6、7、8、9、10 载荷子步的计算结果并显示其变形形状，显示结果如图 5-192b～图 5-192f 所示。

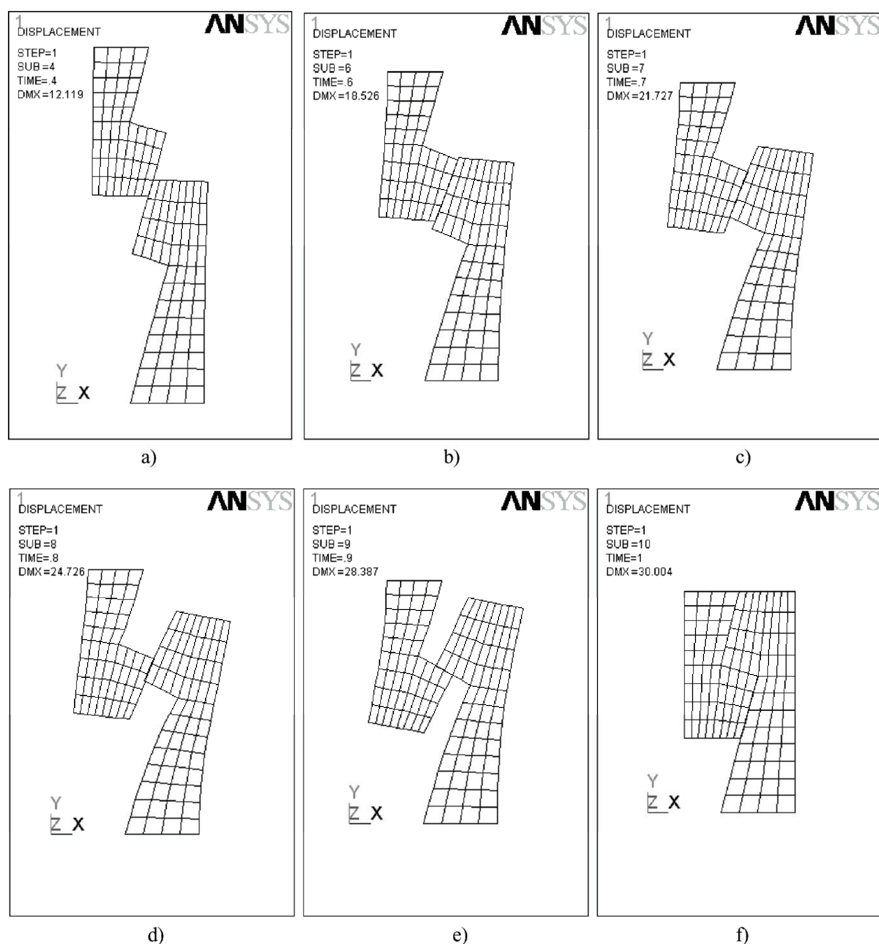


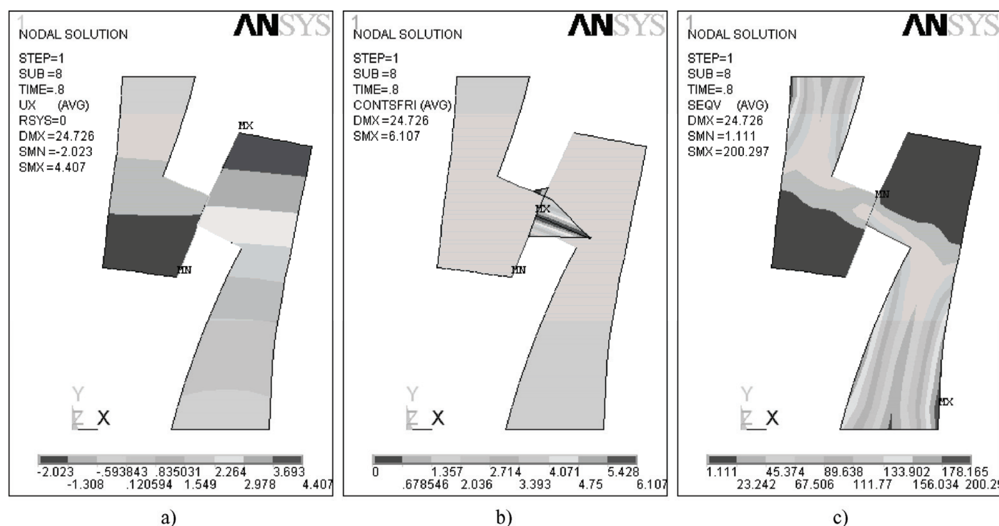
图 5-192 不同载荷子步变形结果显示

4）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step 命令，出现 Read Results by Load Step Number 对话框，在 SBSTEP Substep number 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-193a 所示的 X 方向位移等值线图。

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Contact | Contact friction stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-193b 所示的摩擦应力等值线图。

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-193c 所示的等效应力等值线图。



a)　　　　b)　　　　c)

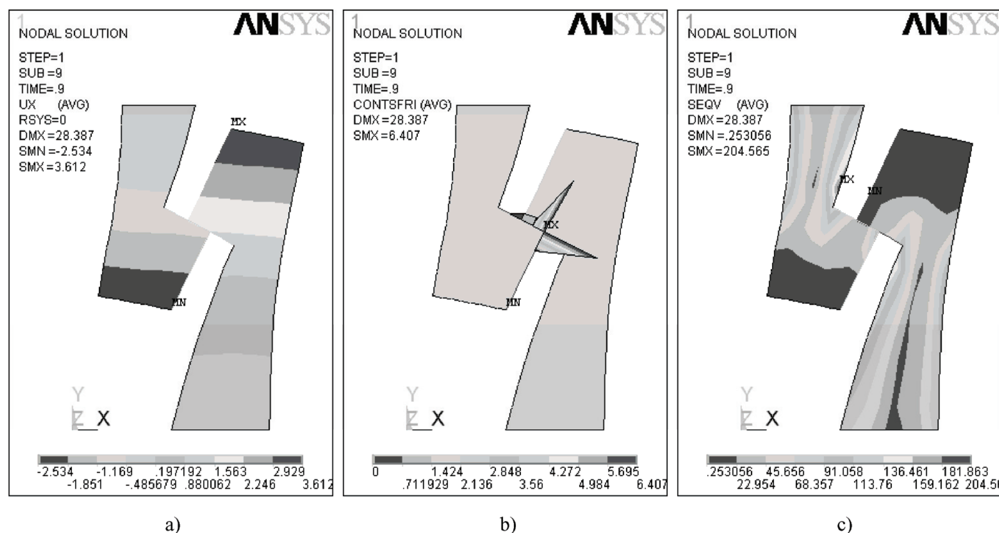
图 5-193　第 8 载荷子步输出结果显示

a) X 方向位移等值线图　b) 摩擦应力等值线图　c) 等效应力等值线图

提示：输出应力单位为 MPa。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step 命令，出现 Read Results by Load Step Number 对话框，在 SBSTEP Substep number 输入栏中输入 9，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）重复第 4）～8）步的操作步骤，显示第 9 载荷子步的相关结果，如图 5-194 所示。



a)　　b)　　c)

图 5-194　第 9 载荷子步输出结果显示

a) X 方向位移等值线图　b) 摩擦应力等值线图　c) 等效应力等值线图

10）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | By Load Step 命令，出现 Read Results by Load Step Number 对话框，在 SBSTEP Substep number 输入栏中输入 10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 5-195 所示的残余应力等值线图。

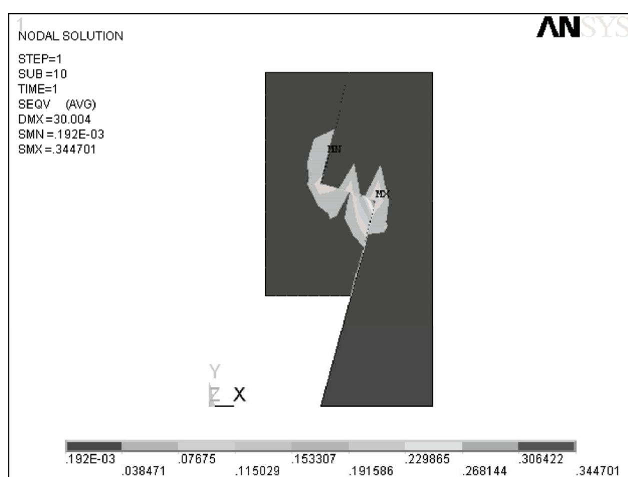


图 5-195　残余应力等值线图

12）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 NC1=NODE（5，40，0），单击 Accept 按钮；在 Selection 输

入栏中输入 NC2=NODE（20，30，0），单击 Accept 按钮；在 Selection 输入栏中输入 NC3=NODE（10，20，0），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

注意：以下操作将在 POST26 后处理器中进行。

13）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Define Variables 命令，出现 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NC1，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 Name User-specified label 输入栏中输入 DISX1，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UX，其余选项采用默认设置，如图 5-196 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）单击 Define Time-History Variables 对话框中的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NC2，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 Name User-specified label 输入栏中输入 DISX2，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UX，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

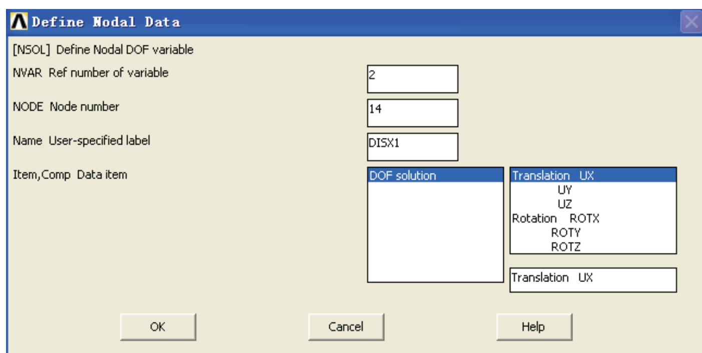


图 5-196 定义节点信息对话框

15）单击 Define Time-History Variables 对话框上的 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NC3，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，在 Name User-specified label 输入栏中输入 DISY，在 Item,Comp Data item 列表框中选择 DOF solution，Translation UY，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）单击 Define Time-History Variables 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Math Operations｜Multiply 命令，出现 Multiply Time-History Variables 对话框，参照图 5-197 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：此操作将时间变量 1 乘以 30，转变为 Y 方向的位移变量 5。这是由于先前在求解器中设置的求解时间为 1，而在此时间内卡头顶面节点 Y 方向的节点位移为 30，同时关闭了 ANSYS 的自动时间步长，表明求解过程中求解时间和位移是一一对应的。

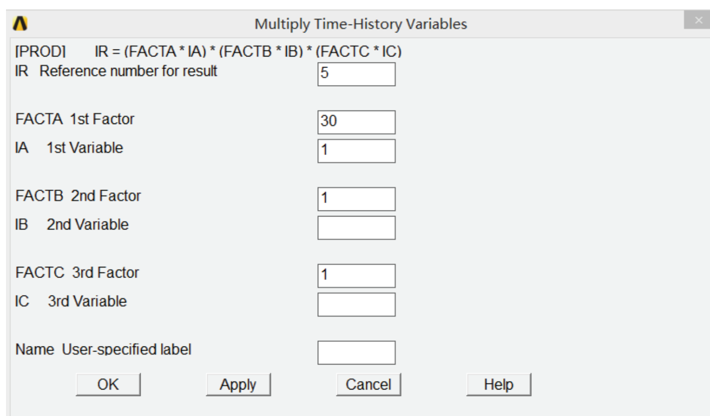


图 5-197 数乘时间-历程变量

18）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Setting | Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在［XVAR］ X-axis variable 选项中选择 Single variable，在 Single variable no.输入栏中输入 5，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将需要绘制的曲线图的 X 坐标定义为卡头顶面节点 Y 方向的节点位移。

19）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］ X-axis label 输入栏中输入 DISPLACEMENT LOAD（mm），在［/AYLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 HORIZONTAL DISPLACEMENT（mm），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：定义曲线图的 X、Y 坐标轴的标题。

20）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 A 点水平位移和压下位移的变化关系曲线，如图 5-198 所示。

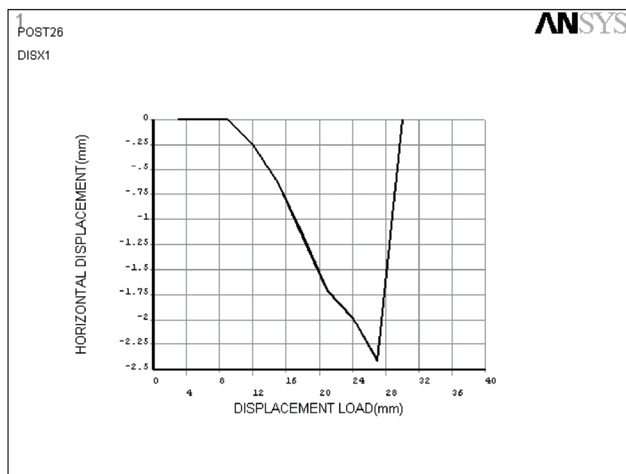


图 5-198 A 点水平位移和压下位移的变化关系

21）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/XRANGE］ X-axis range 选项中选择 Specified range，在 XMIN,XMAX Specified X range 输入栏中分别输入 0、32，在［/YRANGE］ Y-axis range 选项中选择 Specified range，在 YMIN,YMAX Specified Y range 输入栏中分别输入 0、4.8，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：定义曲线图的 X、Y 坐标轴的显示范围。

22）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 L 点水平位移和压下位移的变化关系曲线，如图 5-199 所示。

23）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AYLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 VERTICAL DISPLACEMENT（mm），在［/XRANGE］ X-axis range 选项中选择 Specified range，在 XMIN,XMAX Specified X range 输入栏中分别输入 0、36，在［/YRANGE］ Y-axis range 选项中选择 Specified range，在 YMIN,YMAX Specified Y range 输入栏中分别输入 0、1.6，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1 1st variable to graph 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示 H 点竖直位移和压下位移的变化关系曲线，如图 5-200 所示。

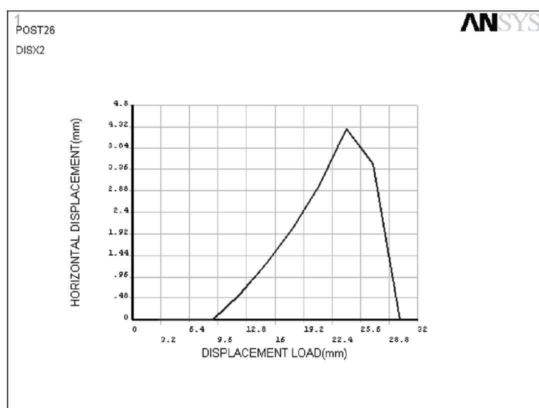


图 5-199　L 点水平位移和压下位移的变化关系

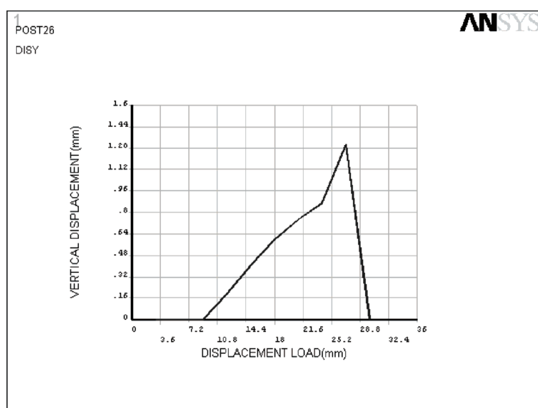


图 5-200　H 点竖直位移和压下位移的变化关系

25）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：改变卡头和卡座的几何形状，依据本例的求解思路进行求解，注意接触对的设置。

5.10.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE9                                ！定义工作文件名
```



```
/TITLE，CONTACT ANALYSIS TO A SNAP-FIT CONNECTOR
！定义工作标题
/PREP7                                  ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                          ！定义单元类型
ET，2，CONTA171
KEYOPT，1，3，3                          ！设置单元关键字
KEYOPT，2，3，3
R，1，5                                  ！定义实常数
R，2，，5，6000
MP，EX，1，3.6E3                         ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.32                        ！输入泊松比
MP，MU，1，0.1                           ！输入摩擦系数

K，1，10                                 ！生成关键点
K，2，20
K，3，15，18.5
K，4，10，20
K，5，12.5，30
K，6，20，30
/PNUM，KP，1                             ！显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                           ！显示线段编号
/PNUM，AREA，1                           ！显示面编号
L，1，3                                  ！由关键点生成线段
L，3，4
L，4，5
L，5，6
L，6，2
L，2，1
AL，ALL                                  ！由线段生成面
LGEN，2，1，3，1                         ！生成线段
K，11，5
K，12，5，30
L，7，11
L，11，12
L，12，10
LSLA，S                                  ！选择面上的所有线段
LSEL，INVERT                             ！反向选择线段
LPLOT                                    ！显示线段
AL，ALL
ALLSEL                                   ！选择所有实体
APLOT                                    ！显示面
RECTNG，0，15，0，10                     ！生成矩形面
ASBA，2，3                               ！面相减
AGEN，2，4，，，0，30，0，，0，1          ！生成面
ALLSEL
NUMCMP，ALL                              ！压缩实体编号
APLOT

K，20，5，50                             ！生成关键点
K，21，20，18.5
```

```
L，20，8                                ！由关键点生成线段
L，3，21
ASBL，2，13                             ！由线段分割面
ASBL，1，14
NUMCMP，ALL
ESIZE，，4                              ！设置单元尺寸
AMAP，3，13，12，11，7                  ！对面实施映射网格划分
AMAP，4，4，5，6，14
LPLOT                                   ！显示线段
LSEL，S，，，4，7，3                    ！选择线段
LESIZE，ALL，，，5                      ！设置线段等分数
LSEL，S，，，1，10，9
LESIZE，ALL，，，8
AMAP，2，10，13，8，9
AMAP，1，1，3，14，2
EPLOT                                   ！显示单元
ALLSEL

LPLOT
LSEL，S，，，9                          ！选择线段
NSLL，S，1                              ！选择线段上的所有节点
CM，SNAP1，NODE                         ！创建节点组元
LSEL，S，，，3
NSLL，S，1
CM，SNAP2，NODE
LSEL，S，，，6
NSLL，S，1
CM，PULL1，NODE
LSEL，S，，，2
NSLL，S，1
CM，PULL2，NODE
ALLSEL
TYPE，2                                 ！指定单元类型参考号
REAL，2                                 ！指定实常数参考号

CM，_NODECM，NODE
CM，_ELEMCM，ELEM
CM，_KPCM，KP
CM，_LINECM，LINE
CM，_AREACM，AREA
CM，_VOLUCM，VOLU
/GSAV，CWZ，GSAV，，TEMP
MP，MU，1，0.1
MAT，1                                  ！指定材料参考号
MP，EMIS，1，7.88860905221E-031
R，3
REAL，3
ET，3，169                              ！定义单元类型
ET，4，172
R，3，，5，0.1，0.1，0，                ！定义实常数
```



```
RMORE，，，1.0E20，0.0，1.0，
RMORE，0.0，0，1.0，，1.0，0.5
RMORE，0，1.0，1.0，0.0，，1.0
KEYOPT，4，3，3                         ！设置单元关键字
KEYOPT，4，4，0
KEYOPT，4，5，0
NROPT，UNSYM
KEYOPT，4，7，0
KEYOPT，4，8，0
KEYOPT，4，9，0
KEYOPT，4，10，2
KEYOPT，4，11，0
KEYOPT，4，12，0
KEYOPT，4，2，0
NSEL，S，，，SNAP2                       ！选择节点组元
CM，_TARGET，NODE
TYPE，3
ESLN，S，0                              ！选择单元
ESURF，ALL                              ！生成接触单元
CMSEL，S，_ELEMCM
NSEL，S，，，SNAP1
CM，_CONTACT，NODE
TYPE，4
ESLN，S，0
ESURF，ALL
ALLSEL
ESEL，ALL                               ！选择所有单元
ESEL，S，TYPE，，3
ESEL，A，TYPE，，4
ESEL，R，REAL，，3
/PSYMB，ESYS，1
/PNUM，TYPE，1
/NUM，1
EPLOT                                   ！显示单元
ESEL，ALL
ESEL，S，TYPE，，3
ESEL，A，TYPE，，4
ESEL，R，REAL，，3
CMSEL，A，_NODECM
CMDEL，_NODECM                          ！删除组元
CMSEL，A，_ELEMCM
CMDEL，_ELEMCM
CMSEL，S，_KPCM
CMDEL，_KPCM
CMSEL，S，_LINECM
CMDEL，_LINECM
CMSEL，S，_AREACM
CMDEL，_AREACM
CMSEL，S，_VOLUCM
CMDEL，_VOLUCM
```

```
/GRES，CWZ，GSAV
CMDEL，_TARGET
CMDEL，_CONTACT
/COM，   CONTACT PAIR CREATION - END
/COM，   CONTACT PAIR CREATION - START
CM，_NODECM，NODE                              ！创建节点组元
CM，_ELEMCM，ELEM
CM，_KPCM，KP
CM，_LINECM，LINE
CM，_AREACM，AREA
CM，_VOLUCM，VOLU
/GSAV，CWZ，GSAV，，TEMP
MP，MU，1，0.1
MAT，1
MP，EMIS，1，7.88860905221E-031
R，4
REAL，4
ET，5，169
ET，6，172
R，4，，5，0.1，0.1，0，
RMORE，，，1.0E20，0.0，5.0，
RMORE，0.0，0，1.0，，1.0，0.5
RMORE，0，1.0，1.0，0.0，，1.0
KEYOPT，6，3，0
KEYOPT，6，4，0
KEYOPT，6，5，0
NROPT，UNSYM
KEYOPT，6，7，0
KEYOPT，6，8，0
KEYOPT，6，9，0
KEYOPT，6，10，2
KEYOPT，6，11，0
KEYOPT，6，12，0
KEYOPT，6，2，0
NSEL，S，，，PULL2
CM，_TARGET，NODE
TYPE，5
ESLN，S，0
ESURF，ALL
CMSEL，S，_ELEMCM
NSEL，S，，，PULL1
CM，_CONTACT，NODE
TYPE，6
ESLN，S，0
ESURF，ALL
ALLSEL
ESEL，ALL
ESEL，S，TYPE，，5
ESEL，A，TYPE，，6
ESEL，R，REAL，，4
```



```
/PSYMB，ESYS，1
/PNUM，TYPE，1
/NUM，1
EPLOT
ESEL，ALL
ESEL，S，TYPE，，5
ESEL，A，TYPE，，6
ESEL，R，REAL，，4
CMSEL，A，_NODECM
CMDEL，_NODECM
CMSEL，A，_ELEMCM
CMDEL，_ELEMCM
CMSEL，S，_KPCM
CMDEL，_KPCM
CMSEL，S，_LINECM
CMDEL，_LINECM
CMSEL，S，_AREACM
CMDEL，_AREACM
CMSEL，S，_VOLUCM
CMDEL，_VOLUCM
/GRES，CWZ，GSAV
CMDEL，_TARGET
CMDEL，_CONTACT
/COM，  CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP，EPLOT
SAVE
FINISH

/SOLU                                        ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                               ！指定分析类型
NLGEOM，ON                                   ！启动大变形选项
TIME，1                                      ！指定计算终止时间
AUTOTS，OFF                                  ！关闭自动时间步长
NSUBST，10                                   ！指定计算子步数
OUTRES，ALL，ALL                             ！存储全部求解结果
NSEL，S，LOC，Y，0                           ！选择节点
D，ALL，ALL                                  ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，Y，60
CP，1，UY，ALL                               ！耦合节点位移
D，ALL，UX
D，ALL，UY，-30                              ！施加位移载荷
ALLSEL                                       ！选择所有实体
SOLVE                                        ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                       ！进入 POST1 后处理器
SET，，4                                     ！读取第 4 子步求解结果
PLDISP，0                                    ！显示变形形状
SET，，6                                     ！读取第 6 子步求解结果
PLDISP，0
```

```
SET，，7                                         ！读取第 7 子步求解结果
PLDISP，0
SET，，8                                         ！读取第 8 子步求解结果
PLDISP，0
SET，，9                                         ！读取第 9 子步求解结果
PLDISP，0
SET，，10                                        ！读取第 10 子步求解结果
PLDISP，0

SET，，8                                         ！读取第 8 子步求解结果
PLNSOL，U，X                                     ！绘制 X 方向位移场等值线图
PLNSOL，CONT，SFRI，0，1                         ！绘制摩擦应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                                   ！绘制等效应力等值线图
SET，，9
PLNSOL，U，X
PLNSOL，CONT，SFRI，0，1
PLNSOL，S，EQV
SET，，10
PLNSOL，S，EQV
FINISH

/POST26                                          ！进入 POST26 后处理器
NC1=NODE(5，40，0)                               ！根据节点坐标获取节点编号
NC2=NODE(20，30，0)
NC3=NODE(10，20，0)
NSOL，2，NC1，U，X，DISX1                        ！定义节点变量
NSOL，3，NC2，U，X，DISX2
NSOL，4，NC3，U，Y，DISY
PROD，5，1，，，，，，30，1，1                    ！变量相乘
XVAR，5                                          ！指定 X 轴显示变量
/AXLAB，X，DISPLACEMENT LOAD(mm)                 ！指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，HORIZONTAL DISPLACEMENT(mm)           ！指定 Y 坐标轴标题
PLVAR，2                                         ！曲线显示变量
/XRANGE，0，32                                   ！指定 X 坐标轴显示范围
/YRANGE，0，4.8                                  ！指定 Y 坐标轴显示范围
PLVAR，3
/AXLAB，Y，VERTICAL DISPLACEMENT(mm)
/XRANGE，0，36
/YRANGE，0，1.6
PLVAR，4
FINISH
/EXIT                                            ！退出 ANSYS
```

5.11　状态非线性实例详解——铜柱体撞击刚性墙分析

5.11.1 问题描述

一个圆柱形铜柱体以 200m/s 的速度撞击刚性墙，如图 5-201 所示，试对撞击过程进行分析。

柱体材料参数：弹性模量 E=117GPa；泊松比 ν=0.32；密度 ρ=8900kg/m^3；剪切模量 E_T=200MPa；屈服强度 σ=400MPa。

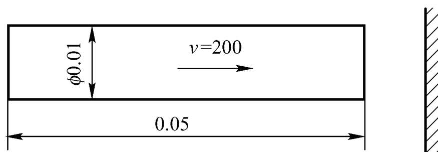


图 5-201　铜柱体撞击刚性墙

5.11.2 问题分析

根据轴对称性，选取铜柱体纵截面的 1/2 建立几何模型，选择 PLANE182 结构单元进行求解。

5.11.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 COPPER CYLINDER IMPACTING A RIGID WALL，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structure Solid，4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element technology K1 下拉选框中选择 Reduced integration，在 Element behavior K3 下拉选框中选择 Axisymmetric，如图 5-202 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

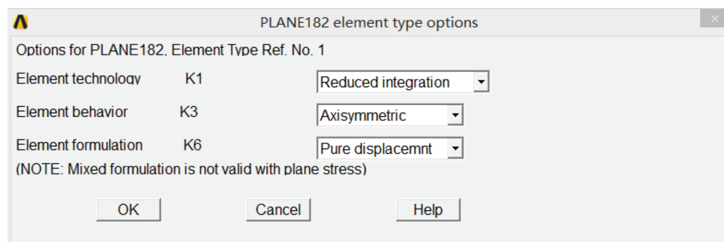


图 5-202　PLANE182 单元属性设置对话框

3）单击 Element Types 对话框中的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 1.17E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.32，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Density 选项，出现 Density for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 8.9E3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Nonlinear、Inelastic、Rate Independent、Isotropic Hardening Plasticity、Mises Plasticity、Bilinear 选项，出现 Bilinear Isotropic Hardening for Material Number 1 对话框，在 Yield Stss 输入栏中输入 4E8，在 Tang Mod 输入栏中输入 2E8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.005，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.05，如图 5-203 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

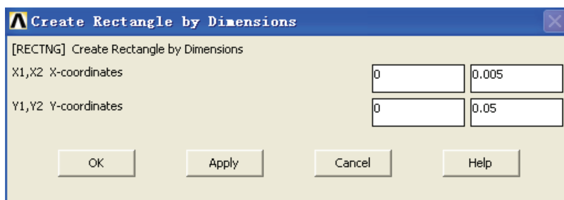


图 5-203　创建矩形面对话框

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L2、L4 分为 20 等份。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。生成的有限元模型如图 5-204 所示。

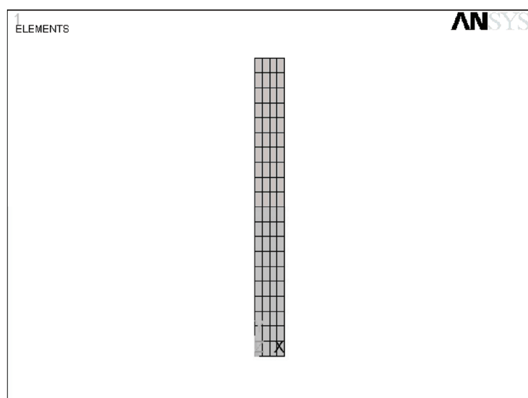


图 5-204　生成的有限元模型

5）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE10-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Transient，单击 OK 按钮，出现 Transient Analysis 对话框，采用其默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol's Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 5-205 所示对其进行设置，单击 Transient 选项卡，参照图 5-206 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

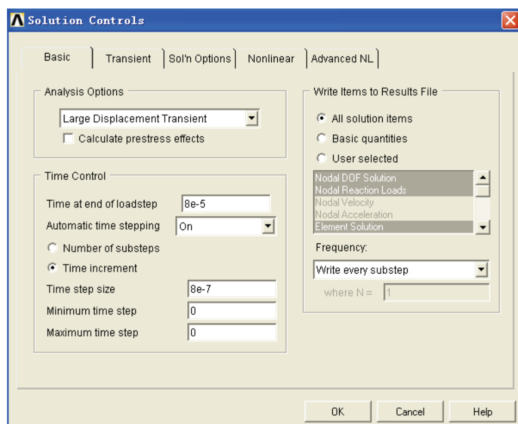


图 5-205　求解控制基本选项设置对话框

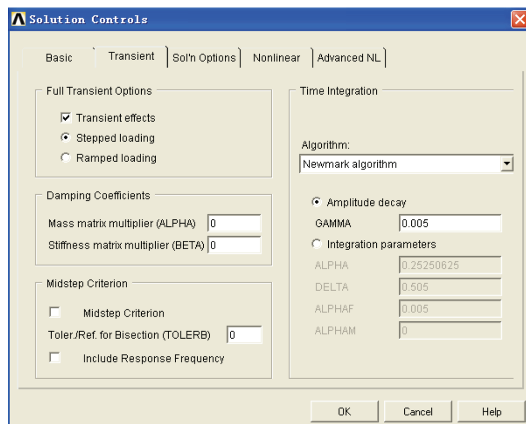


图 5-206　求解控制瞬态选项设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Initial Condit'n | Define 命令，出现 Define Initial C 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Define Initial Conditions 对话框，在 VALUE2　Initial velocity 输入栏中输入-200，如图 5-207 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

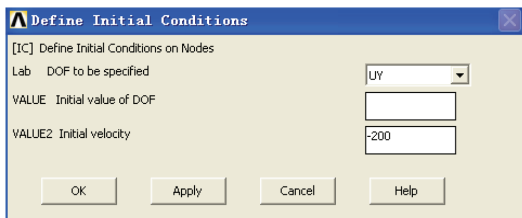


图 5-207 定义初始速度对话框

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-208 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 0 的所有节点，即柱体中心轴线上的节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 VALUE Displacement valne 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加 X 方向的位移约束，即轴对称约束。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，参照图 5-209 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标值为 0 的所有节点，即柱体和刚性墙接触的端面上的节点。

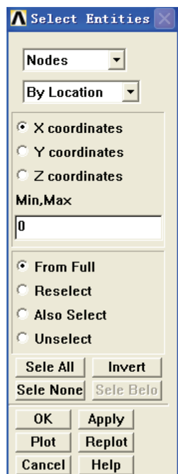


图 5-208 选择节点对话框

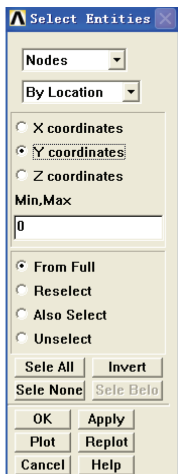


图 5-209 选择节点对话框

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加 Y 方向的位移约束，即柱体和刚性墙接触的端面上的节点沿 Y 轴不可以运动，但沿 X 轴可以运动。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

9）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE10-2.db，保存上述求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-210 所示的变形图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-211 所示的 Y 方向位移等值线图。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-212 所示的等效应力场分布等值线图。

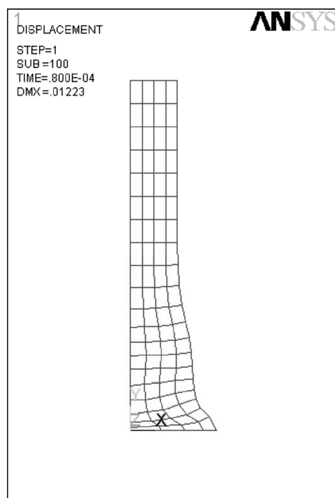


图 5-210 变形图

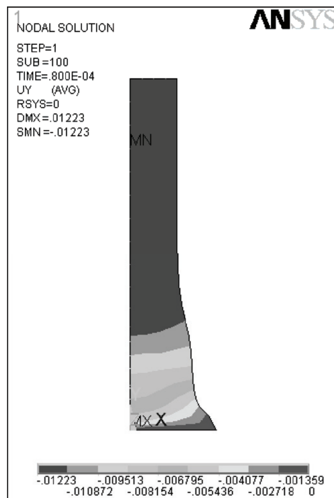


图 5-211 Y 方向位移等值线图

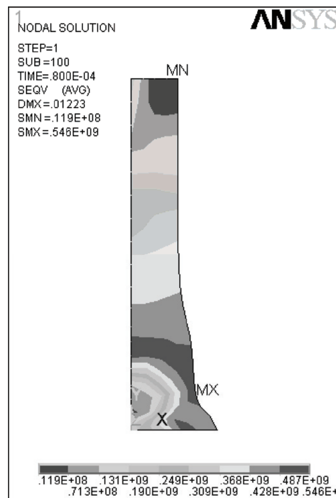


图 5-212 等效应力等值线图

4）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在 Selection 输入栏中输入 NODE=NODE（0，0.05，0），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：选择柱体上端面的中心点。

5）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 NODE，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 5-213 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）单击 Defined Time-History Variables 对话框中的 Close 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Math Operations | Derivative 命令，出现 Derivative of Time-History Variables 对话框，参照图 5-214 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

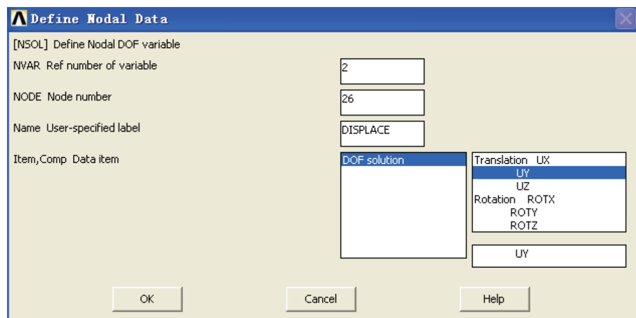


图 5-213　定义节点数据对话框

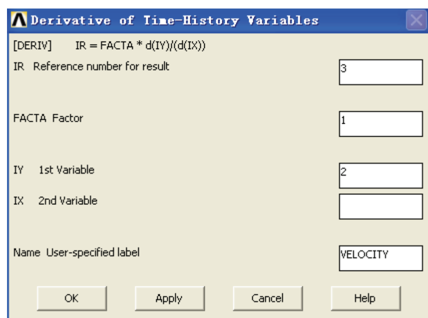


图 5-214　变量求导对话框

提示：对 Y 方向的位移进行求导，即求解 Y 方向的速度。

8）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示铜柱体上端面中心点速度时间曲线，如图 5-215 所示。

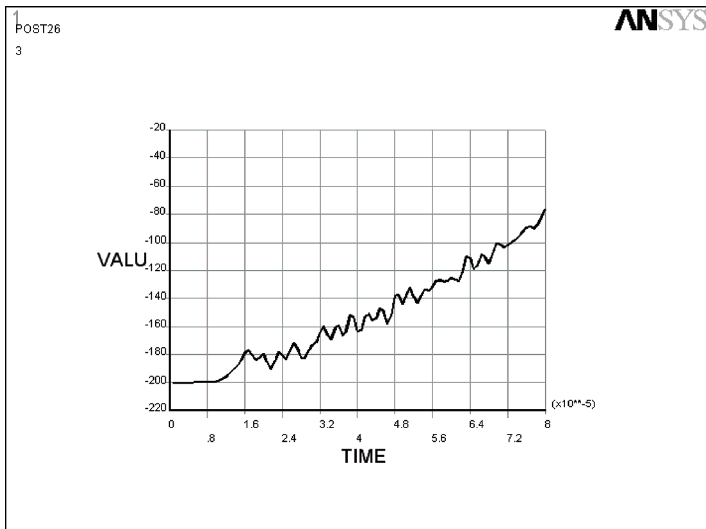


图 5-215　铜柱体上端面中心点速度时间曲线

9）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

✍ **试一试：改变碰撞速度及铜柱体尺寸，比较计算结果的变化。**



5.11.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE10                    ！定义工作文件名
/TITLE，COPPER CYLINDER IMPACTING A RIGID WALL
！定义工作标题
/PREP7                                  ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                         ！定义单元类型
KEYOPT，1，1，1                         ！定义单元关键字
KEYOPT，1，3，1
MP，EX，1，117E9                        ！定义材料性能参数
MP，DENS，1，8900
MP，PRXY，1，0.32
TB，BISO，1，1，，0
TBMODIF，2，1，4E8
TBMODIF，3，1，2E8
RECTNG，0，0.005，0，0.05               ！生成矩形面
LSEL，S，，，2，4，2                    ！选择线段
LESIZE，ALL，，，20                     ！设置线段单元个数
LSEL，S，，，1，3，2
LESIZE，ALL，，，4
AMESH，1                                ！对面划分网格
ALLSEL                                  ！选择所有实体
SAVE
FINISH

/SOLU                                   ！进入求解器
ANTYPE，TRANS                           ！定义求解类型
TRNOPT，FULL
LUMPM，0
NLGEOM，ON                              ！开启大变形选项
TIME，8E-5                              ！定义求解时间
DELTIM，8E-7
AUTOTS，ON                              ！打开自动时间步长选项
KBC，1
OUTRES，ALL，ALL
IC，ALL，UY，，-200                     ！施加速度载荷
NSEL，S，LOC，X，0                      ！选择 X 坐标为 0 的所有节点
D，ALL，UX，0                           ！施加位移载荷
NSEL，S，LOC，Y，0                      ！选择 Y 坐标为 0 的所有节点
D，ALL，UY，0
ALLSEL
SOLVE                                   ！开始求解计算
SAVE
FINISH
```

```
/POST1                                    ! 进入 POST1 后处理器
PLDISP                                    ! 绘制变形图
PLNSOL，U，Y                              ! 绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，S，EQV                            ! 绘制等效应力场等值线图
FINISH

/POST26                                   ! 进入 POST26 后处理器
NODE=NODE(0，0.05，0)
NSOL，2，NODE，U，Y，DISPLACE             ! 定义节点变量
DERIV，3，2，，，，，，，，1，，VELOCITY，，，1 ! 计算节点速度
PLVAR，3                                  ! 绘制铜柱体上端面中心点速度时间曲线
FINISH
/EXIT，ALL                                ! 退出 ANSYS
```

5.12 状态非线性实例详解——挤压过程分析

5.12.1 问题描述

图 5-216 为金属挤压坯料和挤压模具的结构示意图，金属挤压坯料的应力应变关系如图 5-217 所示，坯料与模具之间的摩擦系数为 0.1，求挤压过程中坯料内部的应力场变化。

坯料材料参数：弹性模量 E_1=69GPa；泊松比ν_1=0.26。

模具材料参数：弹性模量 E_2=220GPa；泊松比ν_1=0.3。

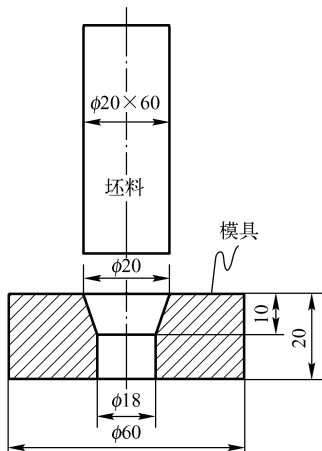


图 5-216　挤压坯料与挤压模具结构示意图

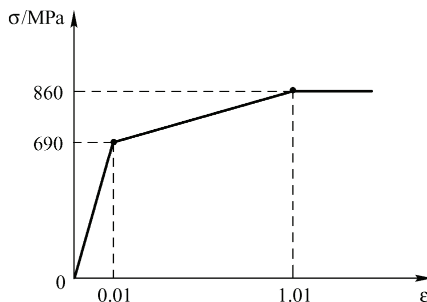


图 5-217　挤压坯料应力应变曲线图

5.12.2 问题分析

该问题属于状态非线性大变形接触问题。在分析过程中，根据轴对称性，选择挤压试样和模具纵截面的 1/2 建立有限元计算模型，并选择 CONTA172 接触单元和 TARGE169 目标单元，以及 PLANE182 结构单元进行求解。

提示：在分析过程中认为模具不发生塑性变形。

5.12.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在输入栏中输入工作文件名 EXERCISE11，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 EXTRUSION EXERCISE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Type 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 的第 1 个列表框中选择 Structural Solid，在第 2 个列表框中选择 Quad 4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-218 所示。

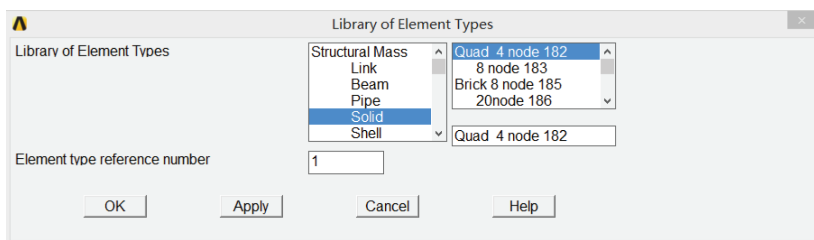


图 5-218 单元类型列表对话框

3）单击 Apply 按钮，在第 1 个列表框中选择 Contact，在第 2 个列表框中选择 2D Target169，在 Element type reference number 输入栏中输入 2。

4）单击 Apply 按钮，在第 1 个列表框中选择 Contact，在第 2 个列表框中选择 3 nd surf 172，在 Element type reference number 输入栏中输入 3。

5）在 Element Types 对话框中选择 Type 1 PLANE182，单击 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉选框中选择 Axisymmetric，如图 5-219 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

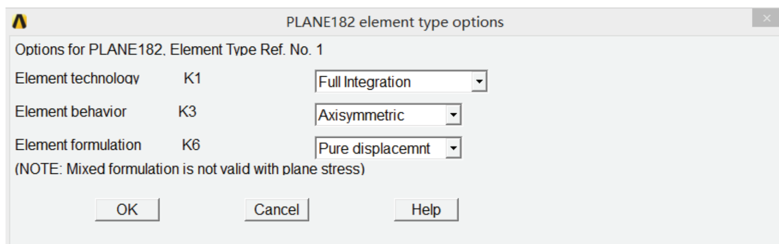


图 5-219 PLANE182 单元属性设置对话框

提示：将 PLANE182 单元设置为轴对称单元。

6）在 Element Types 对话框中选择 Type 3　CONTA172，单击 Options 按钮，出现 CONTA172 element type options 对话框，在 Auto CNOF/ICONT adjustment　K5 下拉选框中选择 Gap/Penetration，如图 5-220 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

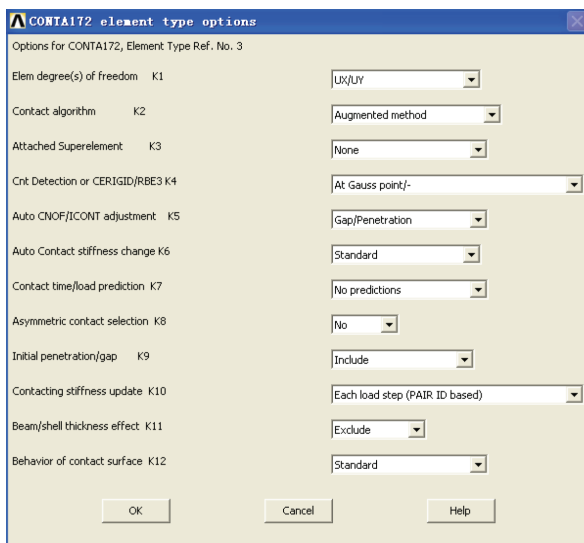


图 5-220　CONTA172 单元属性设置对话框

7）单击 Close 按钮，关闭 Element Types 对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 6.9E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Nolinear、Inelastic、Rate Independent、Isotropic Harding Plasticity、Mises Plasticity、Multilinear 选项，出现 Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1 对话框，单击 Add Point 按钮，在第 1 组输入栏中分别输入 0.01、6.9E8，在第 2 组输入栏中分别输入 1.01、8.6E8，如图 5-221 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）依次单击 Structural、Friction Coefficient 选项，出现 Friction Coefficient for Material Number 1 对话框，在 MU 输入栏中输入 0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Defined 对话框中选择 Material Model Number 2，在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

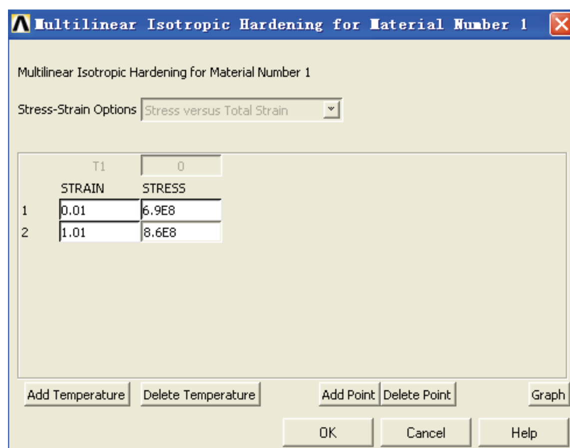


图 5-221 输入材料性能参数对话框

7）依次单击 Structural、Friction Coefficient 选项，出现 Friction Coefficient for Material Number 2 对话框，在 MU 输入栏中输入 0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Real Constants | Add/Edit/Delete 命令，出现 Defined Real Constant Sets 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，选择 TARGE169 单元，单击其上的 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 2，for TARGE169 对话框，参照图 5-222 所示对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

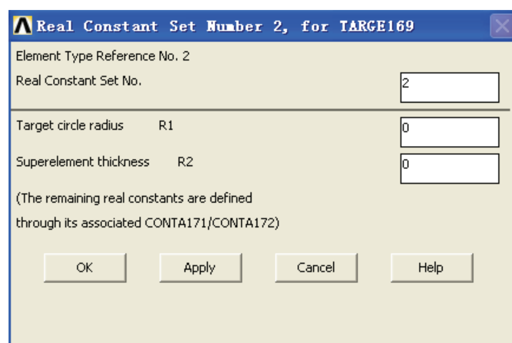


图 5-222 TARGE169 单元实常数设置对话框

10）单击 Close 按钮关闭 Defined Real Constant Sets 对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.01，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.06，如图 5-223 所示，单击 Apply 按钮，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入 9E-3、0.03，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入-0.02、-0.01，单击 OK 按钮关闭该对话框。

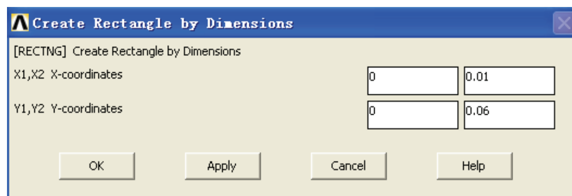


图 5-223　创建矩形面对话框

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入关键点编号 9，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中依次输入关键点坐标值 0.01、0、0，如图 5-224 所示，单击 Apply 按钮，在 NPT　Keypoint number 输入栏中输入关键点编号 10，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中依次输入关键点坐标值 0.03、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

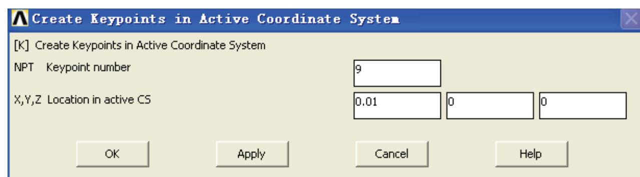


图 5-224　创建关键点对话框

提示：由于第 1）步创建的两个矩形面共有 8 个关键点，因此创建新关键点的编号从 9 开始。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight Line 菜单，在输入栏中输入 9，8，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 10，9，单击 Apply 按钮，在输入栏中输入 7，10，单击 OK 按钮关闭该菜单。

技巧：可通过执行 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框后将相应的关键点编号显示选项从 Off 状态激活为 On 状态来显示关键点的编号。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create Area by Lines 菜单，在输入栏中输入 7，9，10，11，单击 OK 按钮关闭该菜单。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 50，如图 5-225 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 3，

单击 OK 按钮关闭该对话框。

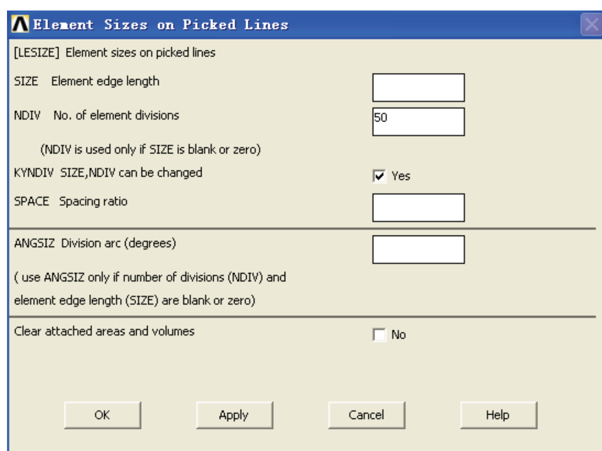


图 5-225　线段等分数设置对话框

提示：将线段 L1、L3 分为 3 等份。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 5，7，10，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，在输入栏中输入 6，8，9，11，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 10，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］　Material number 下拉选框中选择 1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］　Material number 下拉选框中选择 2，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 菜单，在输入栏中输入 2，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

13）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，屏幕上将显示网格划分结果，如图 5-226 所示。

14）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

15）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单

击 OK 按钮，出现 Select Lines 菜单，在输入栏中输入 8，9，单击 OK 按钮关闭该菜单。

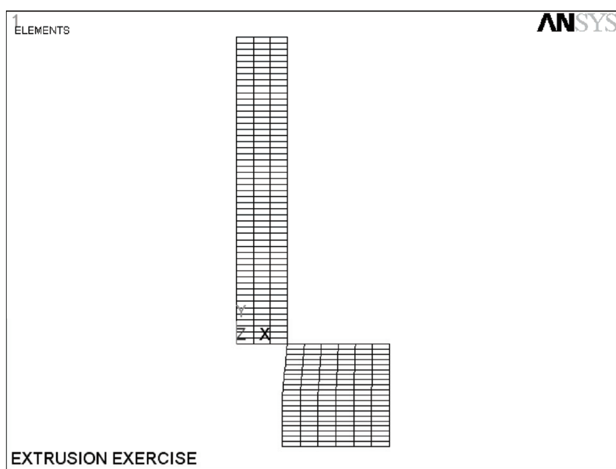


图 5-226　网格划分结果显示

提示：选择线段 L8、L9。

16）选择 Utility Menu | Select | Comb/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname　Component name 输入栏中输入_TARGET，在 Entity Component is made of 下拉选框中选择 Lines，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］　Element type number 下拉选框中选择 2　TARGE169，在［MAT］　Material number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择附属于所选线段的所有节点。

19）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf 命令，出现 Mesh Free Surfaces 对话框，在 Tlab　Surface element form 下拉选框中选择 Top surface，在 Shape　Base shape of TARGE170s 下拉选框中选择 Same as target，单击 OK 按钮，出现 Mesh Free Surfaces 菜单，单击其上的 Pick All 按钮。

20）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

21）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择线段 L2。

22）选择 Utility Menu | Select | Comb/Assembly | Create Component 命令，出现 Create

Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入_CONTACT，在 Entity Component is made of 下拉选框中选择 Lines，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 3 CONTACT172，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择附属于所选线段的所有节点。

25）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Surf/Contact | Surf to Surf 命令，出现 Mesh Free Surfaces 对话框，在 Tlab Surface element form 下拉选框中选择 Top surface，在 Shape Base shape of TARGE170s 下拉选框中选择 Same as target，单击 OK 按钮，出现 Mesh Free Surfaces 菜单，单击其上的 Pick All 按钮。

26）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

27）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE11-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol's Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击其上的 Basic 选项卡，参照图 5-227 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

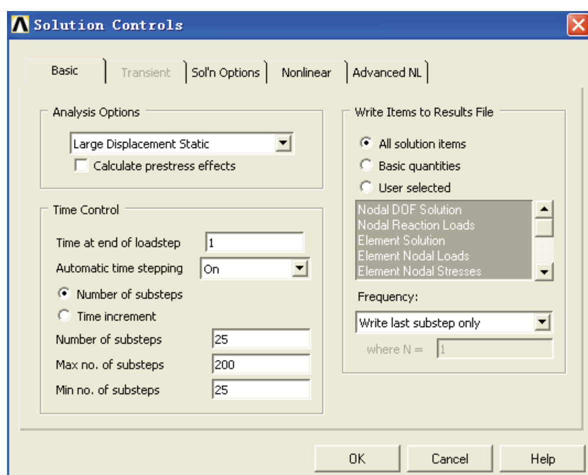


图 5-227 求解过程基本属性设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 菜单，在输入栏中输入 4，6，11，单击 OK 按钮关闭该菜单。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步操作是选择附属于线段 L4、L6 及 L11 上的所有节点，即位于坯料中心轴线上的节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选线段节点施加 X 方向的 0 位移约束（对称轴在挤压过程中沿 X 方向无位移）。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 菜单，在输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步操作是选择附属于线段 L5 上的所有节点，即位于模具底面上的节点。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选线段节点施加 Y 方向的 0 位移约束（模具底面为固定面，在挤压过程中沿 Y 方向无位移）。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：以上两步操作是选择附属于线段 L3 上的所有节点，即位于坯料上端面上的节点。

11）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入-0.03，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选线段节点施加 Y 方向的位移载荷（坯料上端面向下移动 0.03m，模拟挤压过程）。

12）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

13）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE11-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Deformed Shape 命令，出现 Plot Deformed Shape 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-228 所示的变形图。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示径向应力场等值线图，如图 5-229 所示。

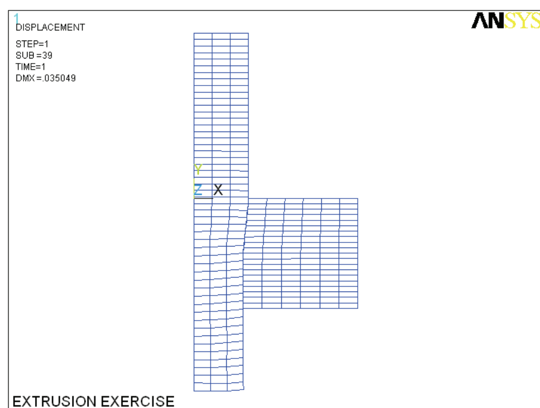


图 5-228 挤压后网格变形图

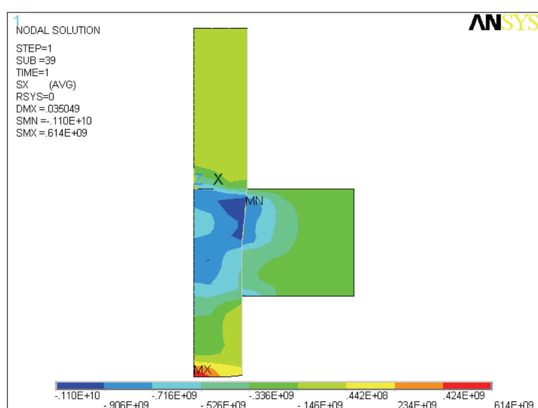


图 5-229 径向应力等值线图

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出

现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示轴向应力场等值线图，如图 5-230 所示。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | Z-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示周向应力场等值线图，如图 5-231 所示。

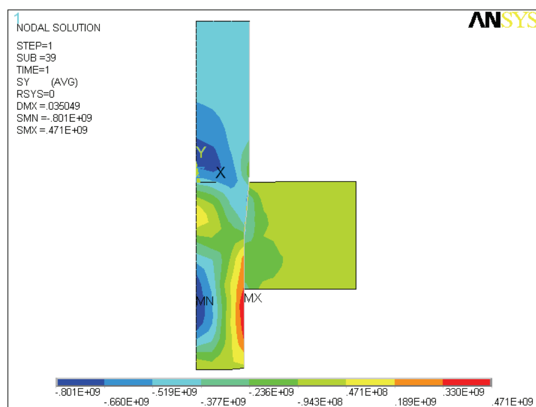


图 5-230　轴向应力等值线图

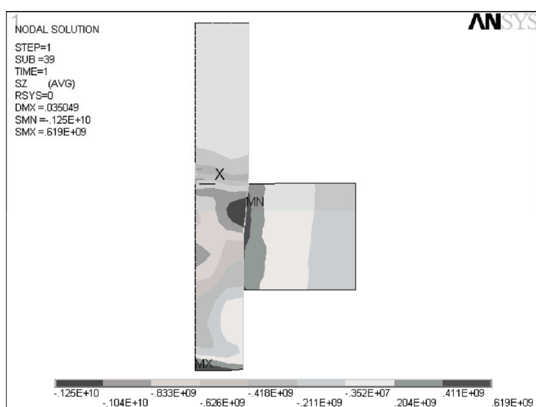


图 5-231　周向应力等值线图

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力场等值线图，如图 5-232 所示。

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Contact | Contact friction stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示接触面上的摩擦应力等值线图，如图 5-233 所示。

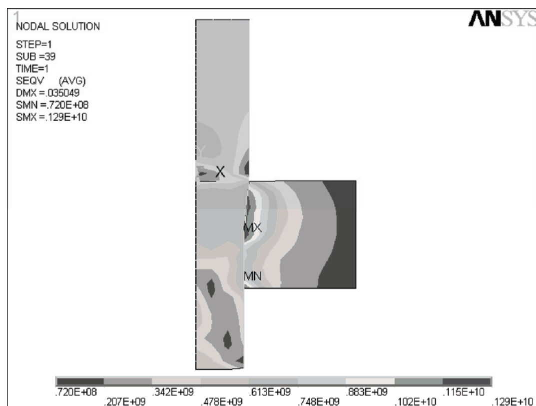


图 5-232　等效应力等值线图

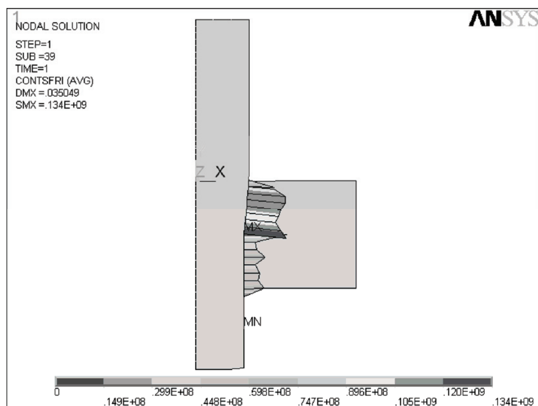


图 5-233　摩擦应力等值线图

8）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

✍ **试一试：**改变模具角度、摩擦系数及坯料变形量，依据本例的求解思路进行求解，分析模具角度、摩擦系数及坯料变形量等挤压参数对坯料成形过程中内部应力场的影响规律。



5.12.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE11                      ! 定义工作文件名
/TITLE，EXTRUSION EXERCISE                ! 定义工作标题

/PREP7                                    ! 进入前处理器
ET，1，PLANE182                           ! 定义平面单元
ET，2，TARGE169                           ! 定义接触单元
ET，3，CONTA172
KEYOPT，1，3，1                           ! 设置单元关键字
KEYOPT，3，5，3
MP，EX，1，6.9E10                         ! 输入挤压材料参数
MP，PRXY，1，0.26
TB，MISO，1
TBPT，，0.01，6.9E8
TBPT，，1.01，8.6E8
MP，MU，1，0.1                            ! 输入摩擦系数
MP，EX，2，2.2E11                         ! 输入模具材料参数
MP，PRXY，2，0.3
MP，MU，2，0.1
R，2                                      ! 定义实常数
REAL，2
RECTNG，0，0.01，，0.06                   ! 创建矩形面
RECTNG，9E-3，0.03，-0.02，-0.01
K，9，0.01                                ! 生成关键点
K，10，0.03
L，9，8                                   ! 由关键点生成线段
L，10，9
L，7，10
LSEL，S，，，7，11，2                     ! 选择线段
LSEL，A，，，10
AL，ALL                                   ! 由所选线段生成面
LSEL，S，，，2，4，2
LESIZE，ALL，，，50                       ! 将所选线段分为 50 等份
LSEL，S，，，1，3，2
LESIZE，ALL，，，3
LSEL，S，，，5，7，2
LSEL，A，，，10
LESIZE，ALL，，，6
LSEL，S，，，9，11，2
LESIZE，ALL，，，10
LSEL，S，，，6，8，2
LESIZE，ALL，，，10
MAT，1                                    ! 指定材料参考号
AMESH，1                                  ! 对面进行网格划分
```

```
MAT，2
AMESH，2
AMESH，3
ALLSEL
LSEL，S,,，8，9
CM，_TARGET，LINE                    ！定义组元
TYPE，2                              ！设置单元类型
NSLL，S，1                           ！选择所选线段上的所有节点
ESURF，ALL                           ！生成表面单元
ALLSEL
LSEL，S,,，2
CM，_CONTACT，LINE
TYPE，3
NSLL，S，1
ESURF，ALL
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU                                ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                       ！定义求解类型
NLGEOM，ON                           ！打开大应变选项
AUTOT，ON                            ！启动自动时间步长选项
TIME，1                              ！设置计算终止时间
NSUB，25，200，25                    ！定义求解步数及求解步长
LSEL，S,,，4，6，2
LSEL，A,,，11
NSLL，S，1
D，ALL，UX                           ！施加位移约束
LSEL，S,,，5
NSLL，S，1
D，ALL，UY
LSEL，S,,，3
NSLL，S，1
D，ALL，UY，-0.03                    ！施加位移载荷
ALLSEL
SOLVE                                ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                               ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST
PLNSOL，S，X                         ！绘制径向应力等值线图
PLNSOL，S，Y                         ！绘制轴向应力等值线图
PLNSOL，S，Z                         ！绘制周向应力等值线图
PLNSOL，S，EQV                       ！绘制等效应力等值线图
PLNSOL，CONT，SFRIC                  ！绘制摩擦应力等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                           ！退出 ANSYS
```

5.13 状态非线性实例详解——LS-DYNA 程序分析锻压过程

5.13.1 问题描述

对一件长方体铝坯料进行锻压，锻压过程中坯料与压头及底座的摩擦系数为 0.2，求锻压过程中坯料内部的应力场变化。

底座材料参数：弹性模量 E_1=220GPa；泊松比ν_1=0.3；密度 ρ_1=7800kg/m^3。

压头材料参数：弹性模量 E_2=220GPa；泊松比ν_2=0.3；密度 ρ_2=7800kg/m^3。

坯料材料参数：弹性模量 E_3=69GPa；泊松比 ν_3=0.33；密度 ρ_3=2700kg/m^3；剪切模量 E_T=50MPa；屈服强度 σ=300MPa。

底座几何参数：200mm×200mm×50mm

压头几何参数：180mm×180mm×50mm

坯料几何参数：100mm×100mm×50mm

5.13.2 问题分析

该问题属于状态非线性大变形接触问题。采用 LS-DYNA 程序求解坯料被下压 10mm 时其内部的应力场。

5.13.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在输入栏中输入工作文件名 EXERCISE12，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 FORGING EXERCISE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Type 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 的第 1 个列表框中选择 LS-DYNA Explicit，在第 2 个列表框中选择 3D Solid 164，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-234 所示，单击 Apply 按钮，再次单击 Apply 按钮，单击 OK 按钮关闭该对话框。

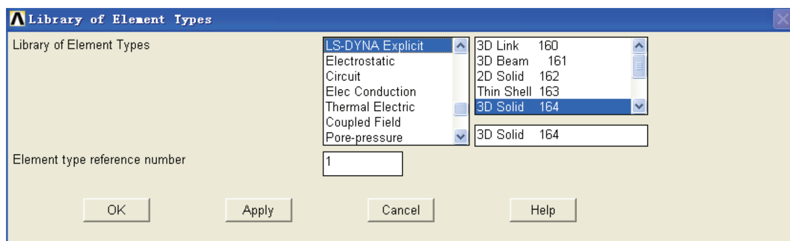


图 5-234 单元类型设置对话框

提示：以上操作将 SOLID164 单元定义 3 次。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 列表框中依次单击 LS-DYNA、Nonlinear、Inelastic、Kinematic Hardening、Bilinear Kinematic 选项，出现 Bilinear Kinematic Properties for Material Number 1 对话框，参照图 5-235 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

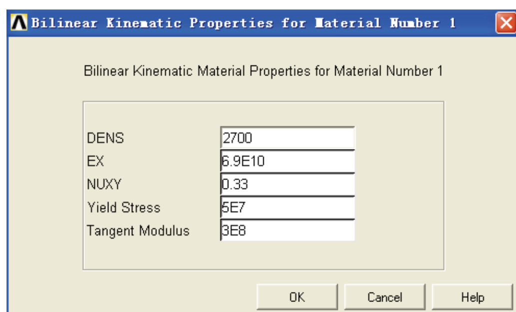


图 5-235　输入材料 1 参数对话框

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Defined 对话框中选择 Material Model Number 2，在 Material Models Available 列表框中依次单击 LS-DYNA、Rigid Material 选项，出现 Rigid Properties for Material Number 2 对话框，参照图 5-236 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Defined 对话框中选择 Material Model Number 3，在 Material Models Available 列表框中依次单击 LS-DYNA、Rigid Material 选项，出现 Rigid Properties for Material Number 3 对话框，参照图 5-237 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

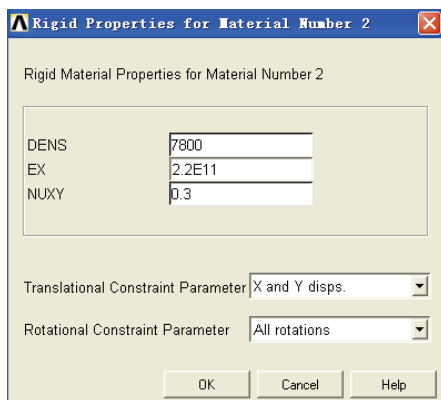


图 5-236　输入材料 2 参数对话框

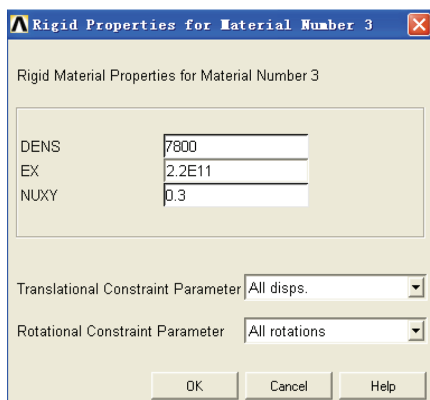


图 5-237　输入材料 3 参数对话框

7）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material｜Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜View Settings｜Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，参照图 5-238 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

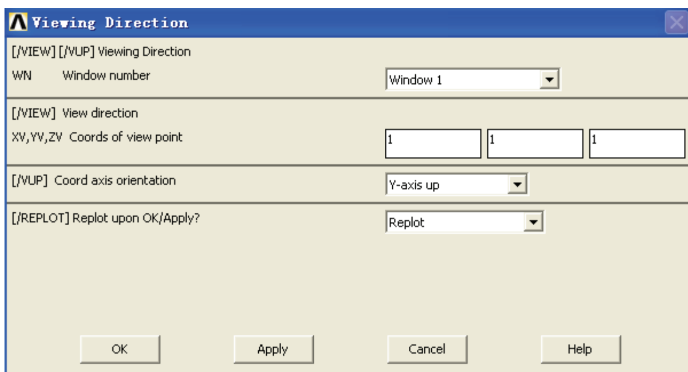


图 5-238 视图显示方向设置对话框

技巧：可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

2）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Volumes｜Block｜By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入-0.1、0.1，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入-0.1、0.1，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中分别输入 0.1、0.15，如图 5-239 所示，单击 Apply 按钮；在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入-0.05、0.05，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入-0.05、0.05，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中分别输入 0.05、0.1，单击 Apply 按钮；在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入-0.09、0.09，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入-0.09、0.09，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.05，单击 OK 按钮关闭该对话框。

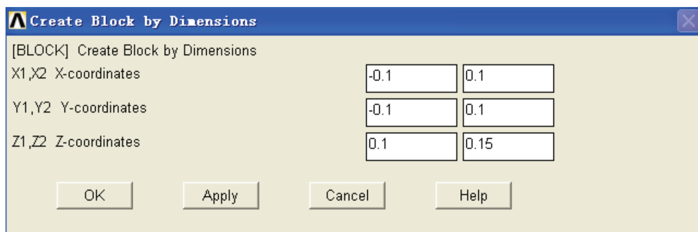


图 5-239 创建长方体对话框

3）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜Mesh Attributes｜Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 SOLID64，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 3，其余选项采用默认设置，单击

OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Global | Sizes 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 0.03，如图 5-240 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

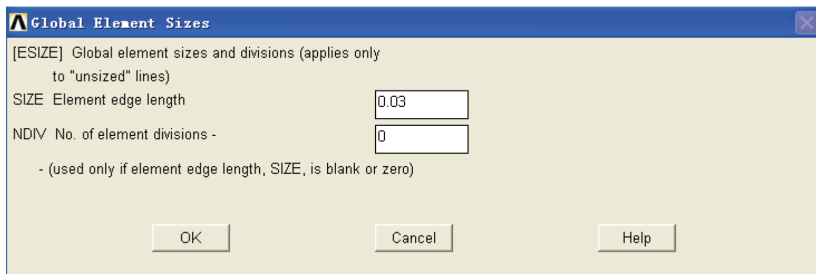


图 5-240　单元尺寸设置对话框

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesher Opts 命令，出现 Mesher Options 对话框，在［MSHKEY］ Set Mesher Key 选项中选择 Mapped，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | 4 to 6 sided 命令，出现 Mesh Volumes 菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 2 SOLID64，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Global | Sizes 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 0.01，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | 4 to 6 sided 命令，出现 Mesh Volumes 菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 3 SOLID64，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Global | Sizes 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 0.03，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Mapped | 4 to 6 sided 命令，出现 Mesh Volumes 菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

13）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，屏幕上将显示网格划分结果，如图 5-241 所示。

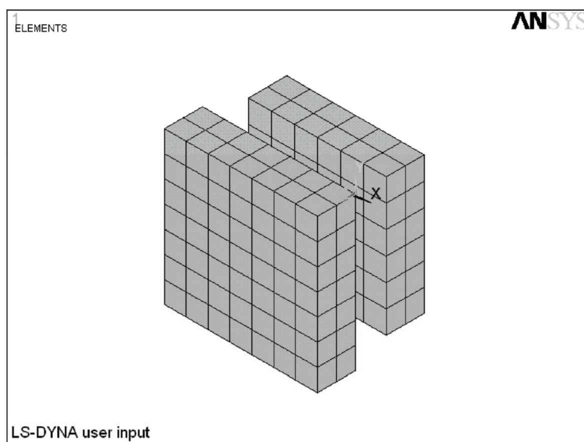


图 5-241　网格划分结果显示

14）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Parts Options 命令，出现 Parts Data Written for LS-DYNA 对话框，在 Option 选项框中选择 Create all parts，如图 5-242 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

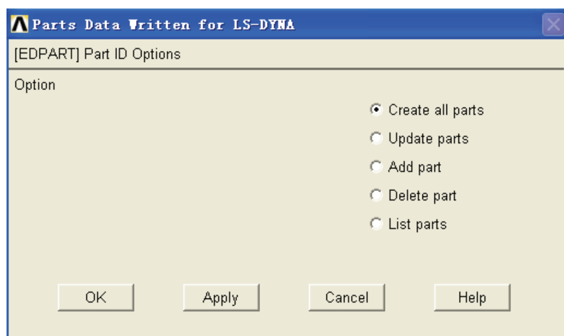


图 5-242　创建 part 对话框

16）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Contact | Define Contact 命令，出现 Contact Parameter Definitions 对话框，在 Contact Type 列表框中选择 Surface to Surf Automatic（ASTS），在 Static Friction Coefficient 输入栏中输入 0.2，在 Death time for contact 输入栏中输入 10000000，如图 5-243 所示，单击 OK 按钮，出现 Contact Options 对话框，在 Contact Component or Part no.下拉选框中选择 2，在 Target Component or Part no.下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Contact | Define Contact 命令，出现 Contact Parameter Definitions 对话框，在 Contact Type 列表框中选择 Surface to Surf Automatic（ASTS），在 Static Friction Coefficient 输入栏中输入 0.2，在 Death time for contact 输入栏中输入 10000000，单击 OK 按钮，出现 Contact Options 对话框，在 Contact Component or Part no.下拉选框中选择 2，在 Target Component or Part no.下拉选框中选择 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。



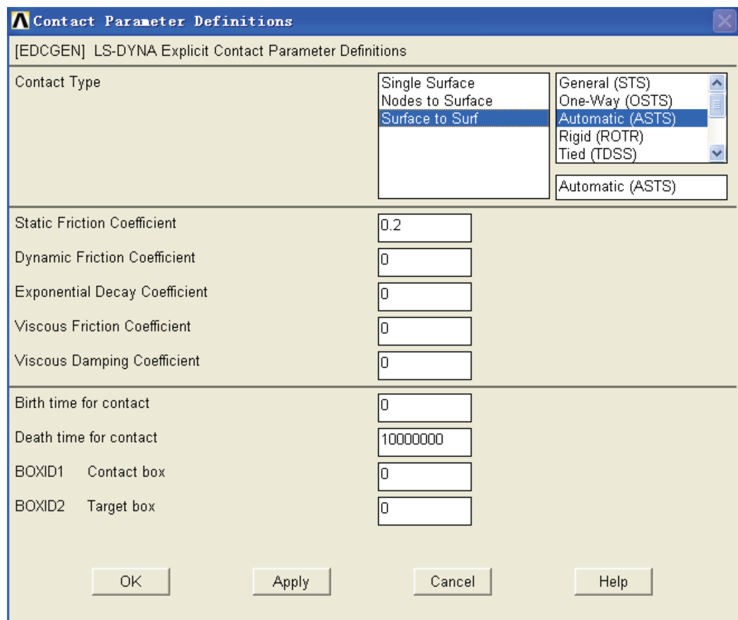


图 5-243　定义接触对话框

18）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Contact | List Entities 命令，出现 List Contact Entities for LS-DYNA Explicit 对话框，在 Contact ID 下拉选框中选择 ALL，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示接触信息，如图 5-244 所示。

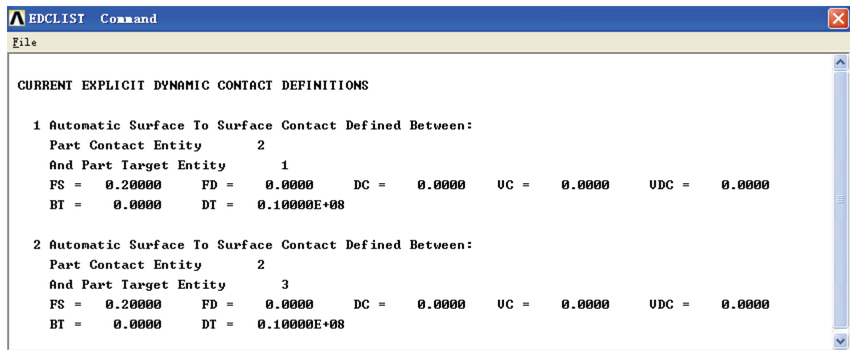


图 5-244　显示接触对话框

19）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

20）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE12-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Utility Menu | Parameters | Array Parameters | Define/Edit 命令，出现 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add New Array Parameter 对话框，在 Par Parameter name 输入栏中输入 T，其余选项采用默认设置，如图 5-245 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框，在 Array Parameters 对话框中单击 Edit 按钮，出现 Array Parameter T 对话

框，参照图 5-246 对其进行设置，然后选择 File | Apply/Quit 命令，关闭该对话框。

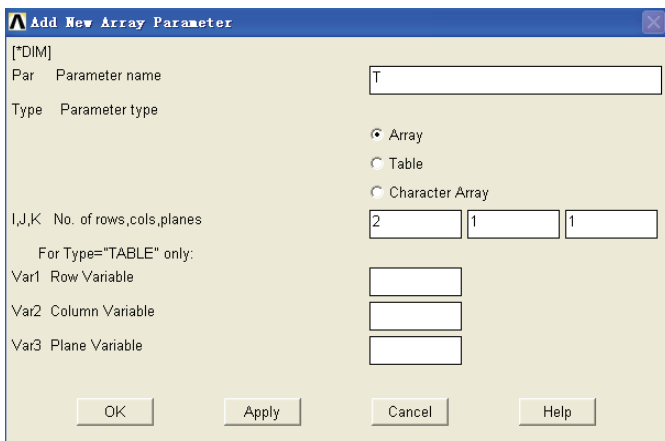


图 5-245　添加数组参数对话框

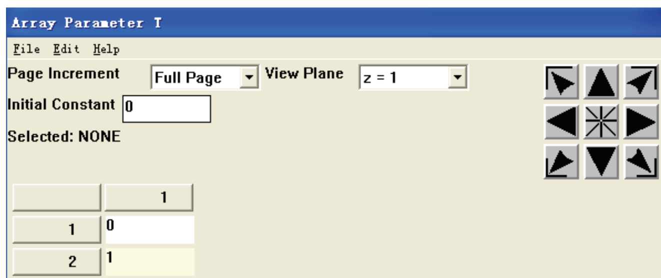


图 5-246　定义数组参数对话框

2）在 Array Parameters 对话框中单击 Add 按钮，出现 Add New Array Parameter 对话框，在 Par　Parameter name 输入栏中输入 D，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框，在 Array Parameters 对话框中选择 D　array，单击 Edit 按钮，出现 Array Parameter D 对话框，参照图 5-247 对其进行设置，选择 File | Apply/Quit 命令，关闭该对话框。

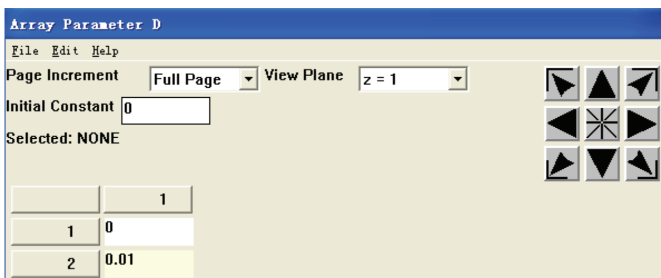


图 5-247　定义数组参数对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Loading Options | Specify Loads 命令，出现 Specify Loads for LS-DYNA Explicit 对话框，参照图 5-248 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

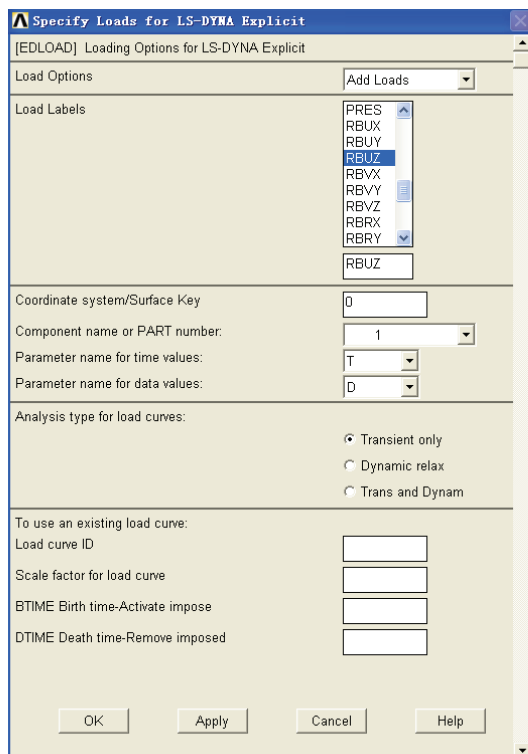


图 5-248　定义载荷对话框

4）选择 Main Menu | Solution | Time Controls | Solution Time 命令，出现 Solution Time for LS-DYNA Explicit 对话框，在［TIME］　Terminate at Time 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Solution | Output Controls | File Output Freq | Number of Steps 命令，出现 Specify File Output Frequency 对话框，参照图 5-249 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

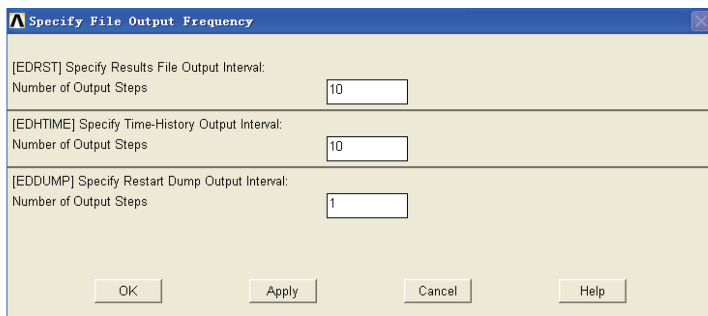


图 5-249　输出设置对话框

6）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，ANSYS/LS-DYNA 开始求解计算。求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

提示：在 LS-DYNA 程序求解过程中，用户可以中断求解进程并检查求解状态，操作方式是在操作窗口按下〈Ctrl+C〉组合键（同时按下键盘上的 Ctrl 键和 C 键），此时 LS-DYNA 将暂时停止运行，用户可以键入以下 4 个开关之一：

SW1：ANSYS/LS-DYNA 终止，并记录一个重启动文件；

SW2：将显示 ANSYS/LS-DYNA 的时间和循环次数，程序继续运行；

SW3：ANSYS/LS-DYNA 记录一个重启动文件，并继续运行；

SW4：ANSYS/LS-DYNA 记录一个结果数据组，并继续运行。

在操作窗口中最初预计的 CPU 计算时间往往是不准确的，可以使用开关 SW2 来得到一个运行时间和循环次数的较好估计值。ANSYS/LS-DYNA 程序将把所有重要信息（如错误、警告、失效单元、接触问题等）都写入到 d3hsp 文件中。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE12-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

2）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Volumes，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Volumes 菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Elements，在第 2 个下拉选框中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Volumes,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择被锻压坯料上的所有单元。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-250 所示的 X 方向位移等值线图。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-251 所示的 Y 方向位移等值线图。

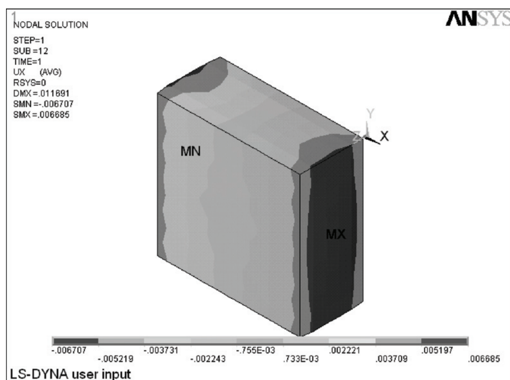


图 5-250　X 方向位移等值线图

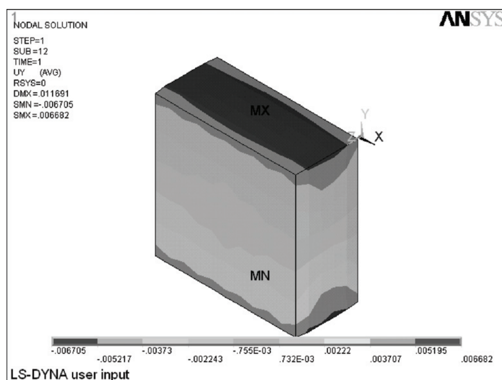


图 5-251　Y 方向位移等值线图

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | DOF Solution | Z-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示如图 5-252 所示的 Z 方向位移等值线图。

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 Apply 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力场等值线图，如图 5-253 所示。

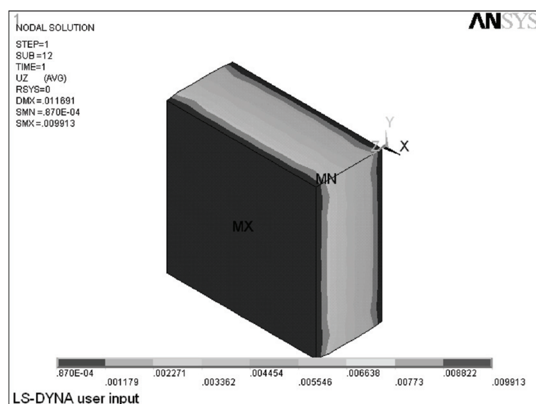


图 5-252　Z 方向位移等值线图

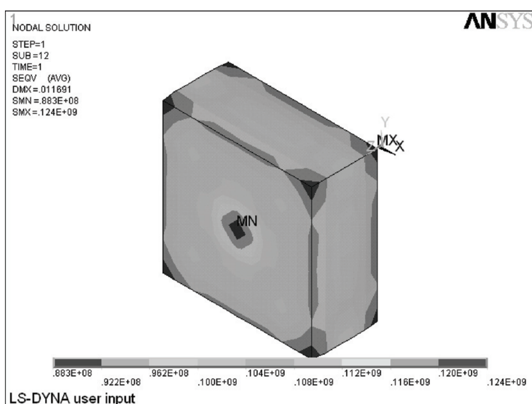


图 5-253　等效应力等值线图

8）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

试一试：改变坯料尺寸、摩擦系数及坯料变形量，依据本例的求解思路进行求解，分析摩擦系数及坯料变形量等挤压参数对坯料锻压过程中内部应力场的影响规律。

5.13.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE12                    ！定义工作文件名
/TITLE，FORGING EXERCISE                ！定义工作标题

/PREP7                                  ！进入前处理器
ET，1，SOLID164                         ！定义单元类型
ET，2，SOLID164
ET，3，SOLID164
MP，EX，1，69E9                         ！定义材料性能参数
MP，DENS，1，2.7E3
MP，NUXY，1，0.33
TB，BKIN，1
TBDAT，1，5E7
TBDAT，2，3E8
MP，EX，2，220E9
MP，DENS，2，7.8E3
MP，NUXY，2，0.3
MP，EX，3，220E9
```

```
MP，DENS，3，7.8E3
MP，NUXY，3，0.3
EDMP，RIGID，2，4，7
EDMP，RIGID，3，7，7
/VIEW，1，1，1，1                                      ！设置视图显示方向
BLOCK，-0.1，0.1，-0.1，0.1，0.1，0.15                ！创建底座
BLOCK，-0.05，0.05，-0.05，0.05，0.05，0.1            ！创建锻压坯料
BLOCK，-0.09，0.09，-0.09，0.09，0，0.05              ！创建压头
TYPE，  1
MAT，  3
REAL，
ESYS，  0
ESIZE，0.03                                            ！定义单元尺寸
MSHAPE，0，3D

MSHKEY，1
VMESH，1                                               ！对体进行网格划分
TYPE，  2
MAT，  1
REAL，
ESYS，  0
ESIZE，0.01
MSHAPE，0，3D
MSHKEY，1
VMESH，2
TYPE，  3
MAT，  2
REAL，
ESYS，  0
ESIZE，0.03
MSHAPE，0，3D
MSHKEY，1
VMESH，3
EDPART，CREATE
EDCGEN，ASTS，  2，  1，0.2，0，0，0，0，  ，  ，  ，  ，0，10000000
EDCGEN，ASTS，  2，  3，0.2，0，0，0，0，  ，  ，  ，  ，0，10000000
                                                       ！定义接触
EDCLIST，ALL                                           ！显示接触状态
SAVE
FINISH

/SOLU                                                  ！进入求解器
*DIM，T，ARRAY，2                                      ！定义数组
*DIM，D，ARRAY，2
*SET，T(1)，0，1
*SET，D(1)，0，0.01                                    ！时间从0到1，载荷从0到0.01
EDLOAD，ADD，RBUZ，0，  3，T，D，  0                   ！施加载荷
TIME，1                                                ！定义求解时间
EDRST，10                                              ！定义输出时间间隔
EDHTIME，10                                            ！定义输出
SOLVE                                                  ！开始求解计算
```

```
SAVE
FINISH

/POST1                                  ！进入 POST1 后处理器
VSEL，S,,，2                            ！选择锻压坯料
ESLV，S                                 ！选择坯料上的所有单元
SET，LAST
PLNSOL， U，X                           ！绘制 X 方向位移等值线图
PLNSOL， U，Y                           ！绘制 Y 方向位移等值线图
PLNSOL， U，Z                           ！绘制 Z 方向位移等值线图
PLNSOL， S，EQV                         ！绘制等效应力等值线图
FINISH
/EXIT，ALL                              ！退出 ANSYS
```

5.14 状态非线性实例详解——LS-DYNA 程序分析弹靶作用过程

5.14.1 问题描述

一弹体以 v=700m/s 的速度侵彻钢靶板，如图 5-254 所示，弹体、靶板的几何参数见表 5.4，弹体采用线弹性材料模型，材料参数见表 5.5，靶板采用动塑性材料模型，材料参数见表 5.6，试对侵彻过程进行分析。

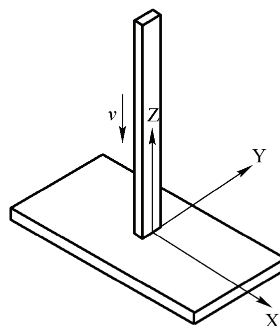


图 5-254 弹体侵彻靶板

表 5.4 弹体和靶板的几何参数（m）

弹体			靶板		
长度	宽度	高度	长度	宽度	厚度
0.2	0.3	5	4	2	0.15

表 5.5 弹体材料参数

弹性模量 E_1/GPa	泊松比 ν_1	密度 ρ_1/（kg/m^3）
220	0.29	7800

表 5.6 靶板材料参数

弹性模量 E_2/GPa	泊松比 ν_2	密度 ρ_2 /（kg/m^3）	屈服强度 σ_Y /（MPa）	剪切模量 E_{2T}/（MPa）	应变率系数 C/s^{-1}	应变率系数 P	失效应变 ε_f
200	0.27	7800	280	930	40	5	0.8

提示：动塑性材料模型：$\sigma_Y=\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right]\left(\sigma_0+\beta E_P \varepsilon_P^{eff}\right)$。

其中，$E_P = \frac{E_T E}{E - E_T}$，$E_T$ 为材料剪切模量；σ_0 为初始屈服强度；$\dot{\varepsilon}$ 为应变率；ε_P^{eff} 为有效塑性应变；C 和 P 分别为 Cowper-Symonds 应变率参数。

5.14.2 问题分析

该问题属于显式动力学分析问题。选取整个弹体建立几何模型，选择 SOLID164 显式动力学分析单元在 ANSYS/LS-DYNA 求解器中进行求解。

5.14.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在输入栏中输入工作文件名 EXERCISE13，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 IMPACT OF A BAR INTO A PLATE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框，在 Library of Element Types 列表框中选择 LS-DYNA Explicit，3D Solid 164，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 5-255 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

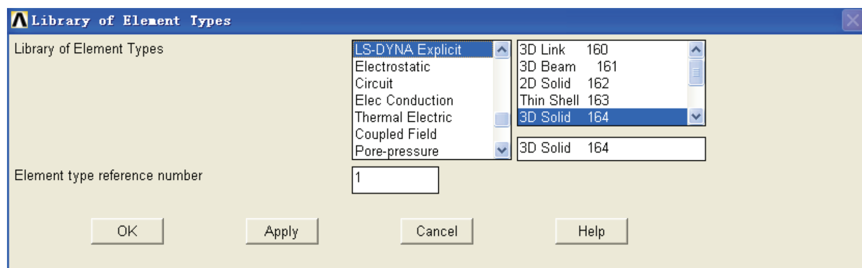


图 5-255 单元类型设置对话框

2）单击 Close 按钮，关闭 Element Types 对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 列表框中依次双击 LS-DYNA、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 DENS 输入栏中输入 7.8E3，在 EX 输入栏中输入 2.2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.29，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Available 列表框中依次双击 LS-DYNA、Nonlinear、Inelastic、

Kinematic Hardening、Plastic Kinematic 选项，出现 Plastic Kinematic Properties for Material Number 2 对话框，参照图 5-256 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

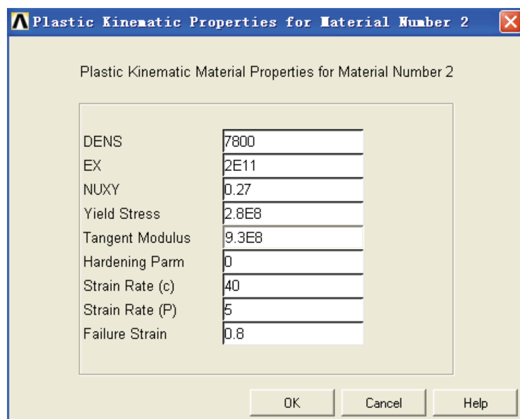


图 5-256　输入靶板材料参数对话框

5）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格并加载

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 输入栏中依次输入 1、1、1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，参照图 5-257 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

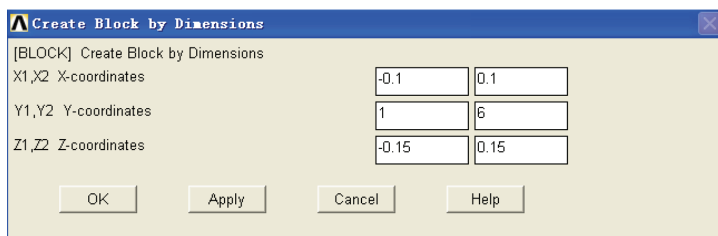


图 5-257　创建长方体对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，5，7，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 9，10，11，12，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，8，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 16，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.2，如图 5-258 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

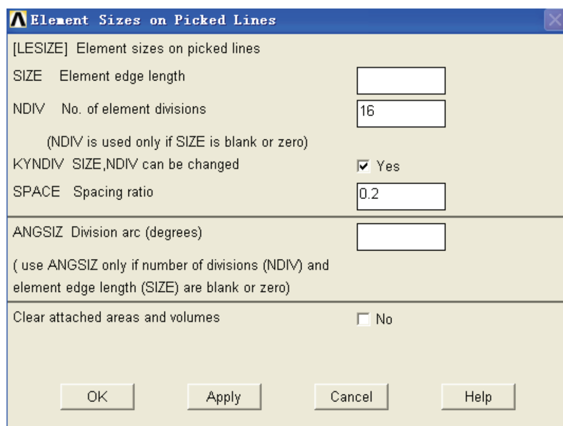


图 5-258 单元尺寸设置对话框

提示：将参与侵彻计算的单元致密化处理。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 3，6，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 16，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

9）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname Component name 输入栏中输入 NBAR，在 Entity Component is made of 下拉选框中选择 Nodes，如图 5-259 所示，单击 Apply 按钮，在 Cname Component name 输入栏中输入 EBAR，在 Entity Component is made of 下拉选框中选择 Elements，单击 OK 按钮关闭该对话框。

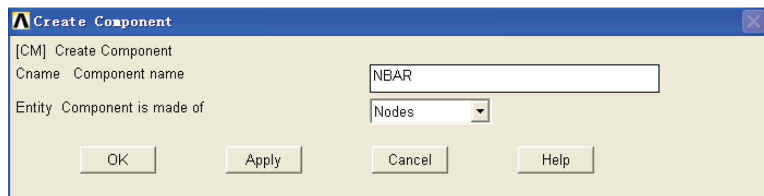


图 5-259 创建组元对话框

10）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Initial Velocity | On Nodes | w/Nodal Rotate 命令，出现 Input Velocity 对话框，在 Input velocity on component 下拉选框中选择 NBAR，在 VY Global Y-component 输入栏中输入-700，如图 5-260 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

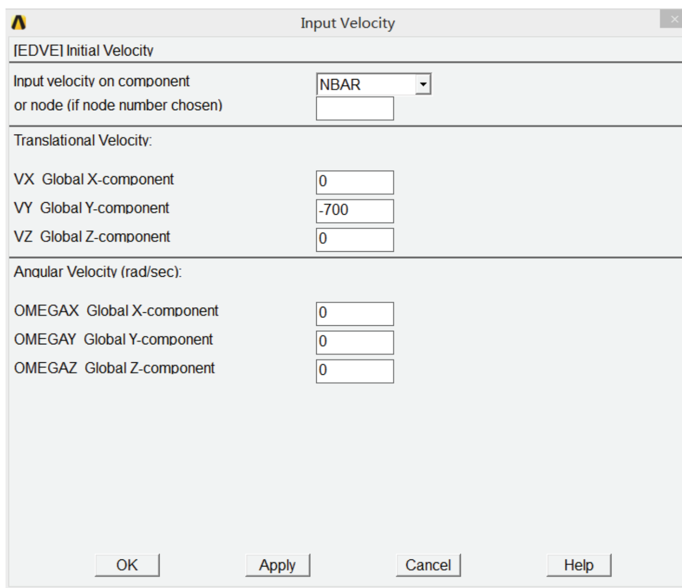


图 5-260　定义初始速度对话框

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2 X-coordinates 输入栏中分别输入-2、2，在 Y1,Y2 Y-coordinates 输入栏中分别输入 0.8、0.95，在 Z1,Z2 Z-coordinates 输入栏中分别输入-1、1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 13，15，18，20，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 14，16，17，19，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 20，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入-0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 21，22，23，24，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 12，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入-0.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh Attributes | Default Attribs 命令，出现 Meshing Attributes 对话框，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按

钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。网格划分结果如图 5-261 所示。

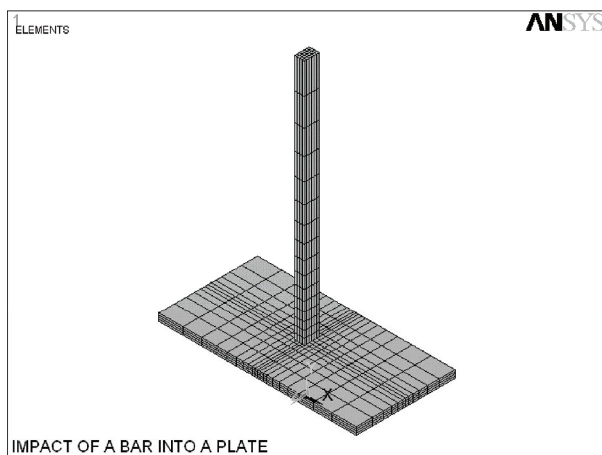


图 5-261　网格划分结果显示

17）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.8， 在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-1.99，1.99，在第 5 栏中选择 Unselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Constraints | Apply | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY、UZ，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 5-262 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

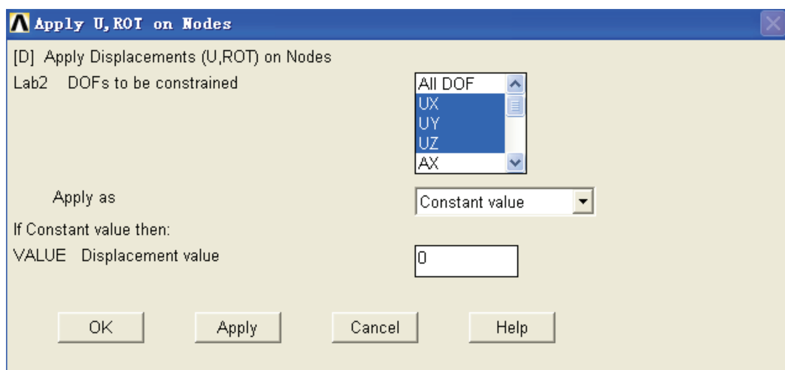


图 5-262　施加位移约束对话框

19）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.8， 在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-0.99，0.99，在第 5 栏中选择 Unselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

20）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Constraints | Apply | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX、UY、UZ，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Parts Options 命令，出现 Parts Data Written for LS-DYNA 对话框，在 Option 选项框中选择 Create all parts，单击 OK 按钮关闭该对话框。

22）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Contact | Define Contact 命令，出现 Contact Parameter Definitions 对话框，在 Contact Type 列表框中选择 Surface to Surf Eroding（ESTS），其余选项采用默认设置，如图 5-263 所示，单击 OK 按钮，出现 Contact Options 对话框，参照图 5-264 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Main Menu | Preprocessor | LS-DYNA Options | Contact | Advanced Controls 命令，出 Advanced Controls 对话框，参照图 5-265 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

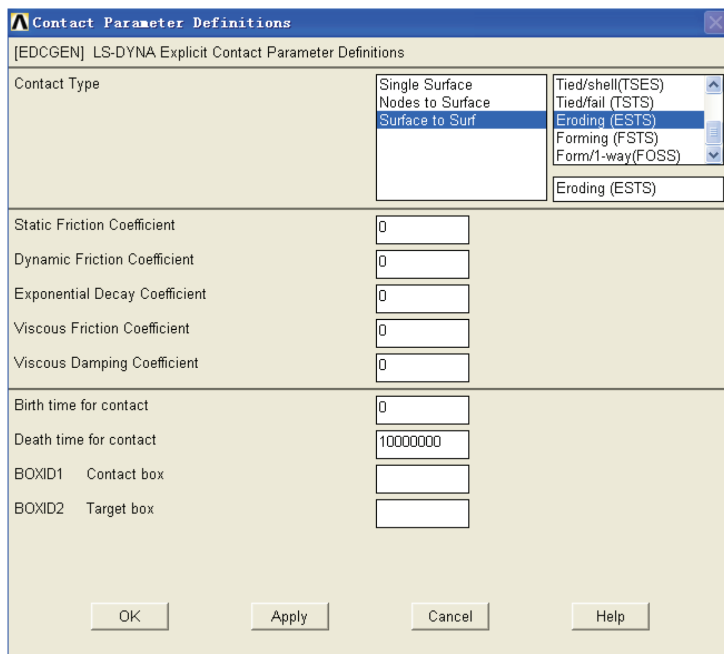


图 5-263 定义接触对话框

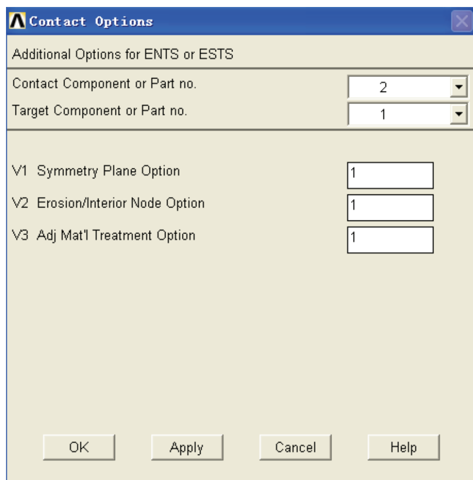


图 5-264　接触选项设置对话框

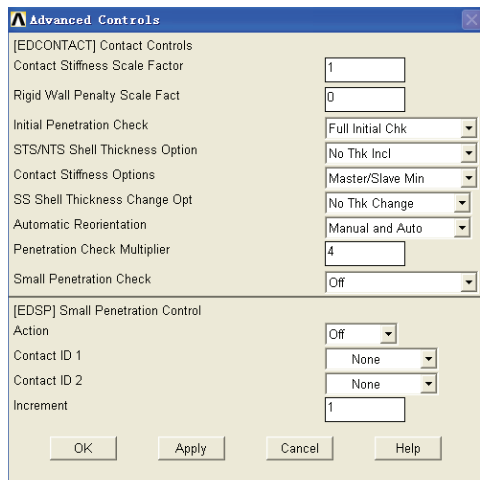


图 5-265　接触分析高级选项设置对话框

24）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

25）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE13-1.db，保存操作过程。

5. 进行求解设置并求解

1）选择 Main Menu | Solution | Time Controls | Solution Time 命令，出现 Solution Time for LS-DYNA Explicit 对话框，在［TIME］ Terminate at time 输入栏中输入 0.002，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Output Controls | File Output Freq | Number of Steps 命令，出现 Specify File Output Frequency 对话框，参照图 5-266 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

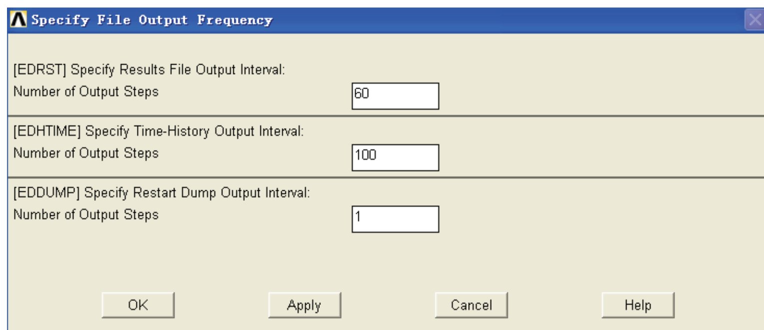


图 5-266　结果文件输出频率设置对话框

3）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，ANSYS / LS-DYNA 开始求解计算。求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

4）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE13-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．在 ANSYS 后处理器中查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向位移等值线图，如图 5-267 所示。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of Stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向应力等值线图，如图 5-268 所示。

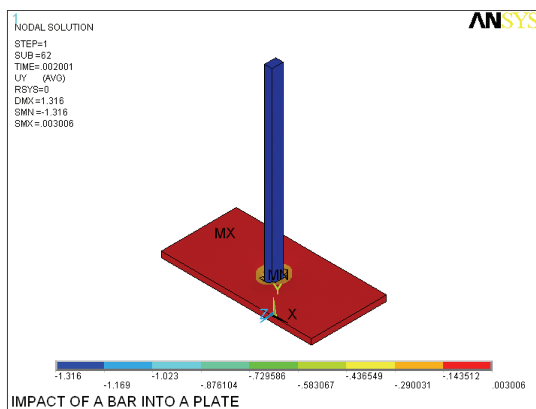


图 5-267　Y 方向位移等值线图

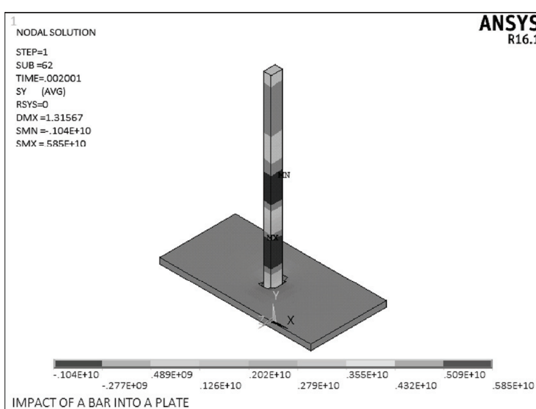


图 5-268　Y 方向应力等值线图

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | Velocity Solution | Y-Component of velocity，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向速度等值线图，如图 5-269 所示。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力等值线图，如图 5-270 所示。

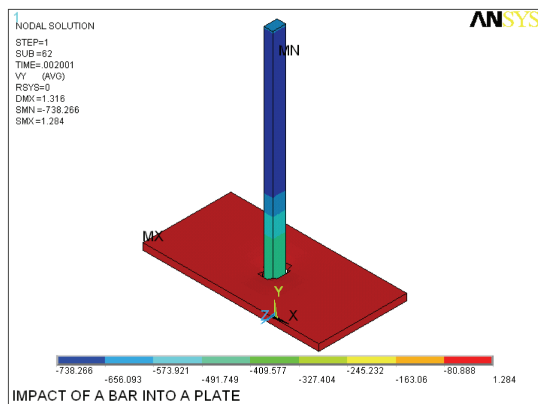


图 5-269　Y 方向速度等值线图

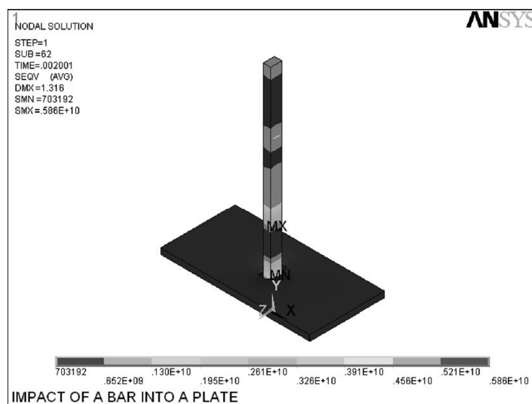


图 5-270　等效应力等值线图

6）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

试一试：将弹体改变为圆柱体，依据本例的求解思路进行求解，比较求解结果的差异。

5.14.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE13                          ！定义工作文件名
/TITLE，IMPACT OF A BAR INTO A PLATE

/PREP7                                        ！进入前处理器
ET，1，SOLID164                               ！指定单元类型
MP，EX，1，220E9                              ！定义材料参数
MP，PRXY，1，0.29
MP，DENS，1，7800
MP，EX，2，200E9
MP，PRXY，2，0.27
MP，DENS，2，7800
TB，PLAW，2，，，1
TBDAT，1，280E6
TBDAT，2，930E6
TBDAT，3，0
TBDAT，4，40
TBDAT，5，5
TBDAT，6，0.8
/VIEW，，1，1，1                               ！设置视图显示方向
/REPLOT
BLOCK，-0.1，0.1，1，6，-0.15，0.15            ！创建长方体
/PNUM，LINE，1                                ！显示线段编号
LPLOT                                         ！显示线段
LSEL，S，，，2，4，2                           ！选择线段
LSEL，A，，，5，7，2
LESIZE，ALL，，，4                             ！设置线段等分数
LSEL，S，，，9，12
LESIZE，ALL，，，6
LSEL，S，，，1，8，7
LESIZE，ALL，，，16，0.2
LSEL，S，，，3，6，3
LESIZE，ALL，，，16，5
ALLSEL
MAT，1
VMESH，1                                      ！对体进行网格划分
CM，NBAR，NODE                                ！创建组元
CM，EBAR，ELEM
EDVEL，VELO，NBAR，，-700                     ！定义初始速度
BLOCK，-2，2，0.8，0.95，-1，1
LPLOT
LSEL，S，，，13，15，2
LSEL，A，，，18，20，2
```

```
LESIZE，ALL，，，4
LSEL，S，，，14，16，2
LSEL，A，，，17，19，2
LESIZE，ALL，，，20，-0.1
LSEL，S，，，21，24
LESIZE，ALL，，，12，-0.2
ALLSEL
MAT，2
VMESH，2
EPLOT

ALLSEL
NSEL，S，LOC，Y，0.8
NSEL，U，LOC，X，-1.99，1.99
D，ALL，UX，0，，，，UY，UZ                 ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，Y，0.8
NSEL，U，LOC，Z，-0.99，0.99
D，ALL，UX，0，，，，UY，UZ
EDPART，CREATE
EDCGEN，ESTS，2，1，，，，，，，1，1，1     ！定义接触选项
EDCONTACT，1.0，，，，，，，2，，0          ！接触选项设置
ALLSEL
SAVE
FINISH

/SOLU                                     ！进入求解器
TIME，0.002                               ！定义求解时间
EDRST，60                                 ！指定结果输出步数
EDHTIME，100                              ！指定时间历程结果输出步数
SOLVE                                     ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                    ！进入 POST1 后处理器
SET，LAST
PLNSOL，U，Y                              ！绘制 Y 方向位移等值线图
PLNSOL，V，Y                              ！绘制 Y 方向速度等值线图
PLNSOL，S，EQV                            ！绘制等效应力等值线图
FINISH
/EXIT                                     ！退出 ANSYS
```

第 6 章　ANSYS 16.1 复合材料结构分析及实例详解



本章导读：

本章主要介绍复合材料结构分析的基本过程及工程应用实例，通过对实例进行具体、详细的分析求解，使读者熟悉复合材料结构问题分析的基本方法和基本步骤，为读者提供典型的复合材料结构问题的求解思路。

6.1　复合材料结构分析基本过程

6.1.1　复合材料介绍

复合材料是由两种或两种以上物理或化学性质不同的材料复合在一起而形成的一种多相固体材料，其主要优点是具有很高的比刚度（刚度与密度之比）。复合材料作为结构材料应用已有很长的历史。目前，复合材料的应用已非常普遍，涉及航空、航天、军事、民用等诸多领域。

ANSYS 程序提供了一种特殊的单元——层单元来模拟复合材料，利用这些单元就可以进行任意的复合材料结构分析。

复合材料结构分析也包括建模、加载求解及后处理 3 个基本步骤，其中加载求解及后处理基本等同于一般的结构分析过程，建模部分具有其特殊性，下面主要对其建模部分进行详细讨论。

6.1.2　建立复合材料模型

与一般的各向同性材料相比，复合材料的建模过程要相对复杂。由于各层材料性能为任意正交各向异性，材料性能与材料主轴取向有关，因此在定义各层材料性能和方向时要特别注意。在本节中，主要探讨以下问题：

- 选择适当的单元类型。
- 定义材料层的配置。
- 确定失效准则。
- 应遵循的建模和后处理规则。

1．选择适当的单元类型

用于建立复合材料模型的单元有 SHELL181、SHELL281、SOLSH190、SOLID185 及

SOLID186 五种单元，单元类型的选择主要根据具体的应用和所需计算的结果类型来确定。

（1）SHELL181 单元

SHELL181 单元是一种 4 节点 3D 壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元具有包含大应变的完全的非线性性能，允许 255 层的复合材料结构。各层的信息可通过横截面相关命令输入。

注意：ANSYS 16.1 版本中，基本上不再支持通过实常数的方式输入杆单元、梁单元或壳单元的横截面几何结构信息，更多情况下是采用横截面相关命令进行设置。

（2）SHELL281 单元

SHELL281 单元是一种 8 节点 3D 壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元适合薄的或具有适当厚度的壳体结构分析，可用于线性以及具有大转动或大应变的非线性复合材料结构分析。各层的信息可通过横截面相关命令输入。

（3）SOLSH190 单元

SOLSH190 单元是一种 8 节点 3D 壳单元，每个节点有 3 个自由度：节点 x、y 和 z 方向的平动，因此，无须额外的操作，SOLSH190 就可与其他的连续介质单元相连接。 该单元可以退化为三角形棱柱单元，但只能在网格划分时被当作填充单元来使用。该单元具有包含大应变的完全的非线性性能，允许 255 层的复合材料结构，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续，适合于具有各种厚度的壳体结构分析。各层的信息可通过横截面相关命令输入，可以使用 FC 命令输入失效准则。

（4）SOLID185 单元

SOLID185 单元是 8 节点 3D 实体单元，它的每个节点有 3 个自由度：节点 x、y 和 z 方向的转动。可以用来建立叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许 250 层的等厚度材料层，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续。运用该单元可以进行复合材料结构的塑性、超弹性、蠕变、大挠度、大应变及应力刚化分析。

（5）SOLID186 单元

SOLID186 单元是 20 节点 3D 实体单元，是 SOLID185 单元的高阶形式，可以用来建立叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许 250 层的等厚度材料层，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续，支持复合材料的非线性行为和大变形。

2．定义材料的叠层结构

复合材料最重要的特征就是叠层结构，每层材料都可能由不同的正交各向异性材料构成，并且其主轴方向也有可能不同。对于叠层复合材料，纤维的方向决定了层的主方向。

下面两种方法可以定义材料层的配置：

- 通过定义各层的材料性质。
- 通过定义表征宏观力、力矩与宏观应变，曲率之间相互关系的本构矩阵。

（1）定义各层材料性质

这种方法由下到上一层一层定义材料层的配置，底层为第一层，后续层沿单元坐标系的正 Z 轴方向自底向上叠加。

有时，某些层可能只延续到模型的一部分，为了建立连续的层，可以把这些中断的层的厚度设置为 0。图 6-1 所示为一个 5 层模型，其中第 2 层在某处中断。

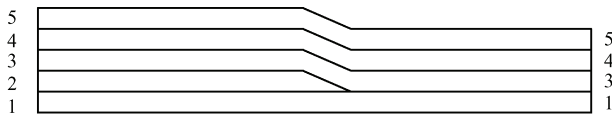


图 6-1　中断层模型

通过如下命令定义材料层性质：

Command：SECTYPE、SECDATA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Add/Edit

所定义的材料层性质包括：

- 材料性质。
- 层的定向角。
- 层厚度。
- 每层积分点数。

（2）定义本构矩阵

这是定义各层材料性质的另一种方式，该矩阵表征了单元力、力矩和应变、曲率的关系，必须在 ANSYS 外进行定义，可参阅 ANSYS 理论手册。这种方法的主要优点是：

- 允许用户对聚合物基复合材料的性质进行合并。
- 支持热载荷向量。
- 可表征层数无限制的材料。

矩阵项通过层命令来定义，通过定义单元平均密度可以将质量影响考虑进去。如果使用这种方法，就无法得到每层材料的详细信息。

（3）夹层（“三明治”）结构和多层结构

夹层结构是由两个薄的面板和一个厚的但相对较软的夹心层（至少为总厚度的一半）构成，并假定夹心层承受了所有的横向剪切载荷，而面板则承受了所有的（或几乎所有的）弯曲载荷。图 6-2 所示为一个夹层结构。

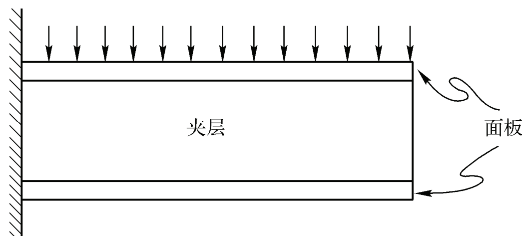


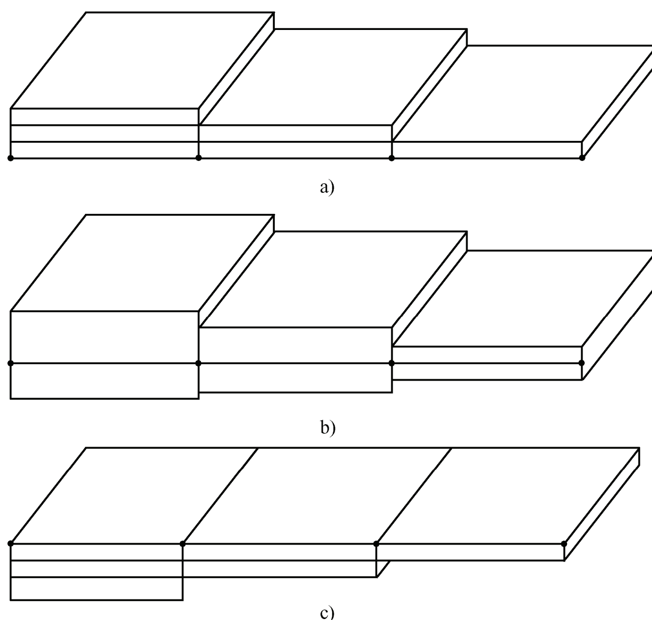
图 6-2　夹层结构

夹层结构可以用 SHELL181 单元来进行建模。

（4）节点偏置

对于 SHELL181 单元而言，在定义横截面的过程中通过使用 SECOFFSET 命令偏置节点。如果壳是由不同厚度的几部分构成的（台阶状），则节点偏置应遵循以下原则：

- 若各部分壳的底面在同一平面上，则将单元节点偏置到壳的底面上（参见图 6-3a）。
- 若各部分壳的中面在同一平面上，则将单元节点偏置到壳的中面上（参见图 6-3b）。
- 若各部分壳的顶面在同一平面上，则将单元节点偏置到壳的顶面上（参见图 6-3c）。



a)

b)

c)

图 6-3　不同结构的节点偏置

3．定义失效准则

失效准则用于获知在所加载荷条件下，各层是否会失效。用户可以从 3 种已定义的失效准则中进行选择，也可以自定义多达 6 种的失效准则。3 种已定义的失效准则是：

- 最大应变失效准则，它允许有 9 个失效应变。
- 最大应力失效准则，它允许有 9 个失效应力。
- Tsai-Wu 失效准则，它允许有 9 个失效应力和 3 个附加的耦合系数。

定义失效准则的命令如下：

（1）Command：FC（FCLIST、FCDELE）

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models | Structural | Nonlinear | Inelastic | Non-Metal Plasticity | Failure Criteria

GUI：Main Menu | General Postproc | Failure Criteria

定义失效准则的典型的命令流如下：

```
FC，1，TEMP，，100，200
FC，1，S，XTEN，1500，1200
FC，1，S，YTEN，400，500
FC，1，S，ZTEN，10000，8000
FC，1，S，XY ，200，200
FC，1，S，YZ ，10000，8000
FC，1，S，XZ ，10000，8000
FCLIST，，100
FCLIST，，150
FCLIST，，200
PRNSOL，S，FAIL
```

（2）Command：TB、TBTEMP、TBDATA

GUI：Main Menu | Preprocessor | Material Props | Failure Criteria

定义失效准则的典型的命令流如下：

```
TB，FAIL，1，2
TBTEMP，，CRIT
TBDATA，2，1
TBTEMP，100
TBDATA，10，1500，，400，，10000
TBDATA，16，200，10000，10000
TBLIST
TBTEMP，200
TBDATA
```



定义失效准则的过程中应注意以下事项：

- 失效准则是正交各向异性的，因此必须在所有的方向上定义失效应力或失效应变。
- 如果不希望在某个特定的方向上检查失效应力或失效应变，则在该方向上定义一个较大的值。

用户自定义失效准则可以通过用户子程序 USRFC1 到 USRFC6 来定义，详情可参阅 ANSYS 用户手册。

4．建模和后处理规则

在复合材料的建模和后处理过程中应注意以下规则：

1）复合材料会呈现出多种耦合效应，如弯扭耦合、拉弯耦合等，这是由于具有不同性质的材料层相互叠合而引起的。它所导致的结果是：如果材料层的叠合顺序是非对称的，即使模型的几何形状和载荷都是对称的，也不能按照对称条件求解，因为结构的位移和应力可能不对称。

2）在模型自由边界上的层间剪切应力通常都是很重要的，要得到这些部位相对精确的层间剪切应力，模型边界上的单元尺寸应约等于总的叠层厚度。对于壳单元而言，增加实际材料层数并不一定能提高层间剪切应力的求解精度。但是，对于 SOLID185 单元而言，沿厚度方向叠加单元会使得层间剪切应力的求解更为精确。壳单元的层间横向剪切应力的计算基于单元上下表面不承受应力的假设，这些层间剪切应力只在单元的中心处计算，而不是沿着单元边界，可以考虑使用子模型精确计算自由边的层间应力。

3）由于复合材料结构的求解需要输入大量的数据，通常在求解之前要对这些数据进行检验，可通过以下命令实现：

- Command：ELIST

GUI：Utility Menu｜List｜Elements

此命令功能为列表显示所有被选单元的节点和属性。

- Command：EPLOT

GUI：Utility Menu｜Plot｜Elements

此命令功能为图形显示所有被选单元。

- Command：/PSYMB，LAYR，n

GUI：Utility Menu｜PlotCtrls｜Symbols

在执行 EPLOT 命令之前执行该命令，可图形显示所选全部单元的第 n 层，它可以用于显示并检验整个模型的每一层。

● Command：/PSYMB，ESYS，1

GUI：Utility Menu | PlotCtrls | Symbols

在执行 EPLOT 命令之前执行该命令，可显示出那些默认单元坐标系被改变了的单元坐标系。

● Command：LAYLIST

GUI：Utility Menu | List | Elements | Layered Elements

该命令可列表显示层的叠加顺序和两种材料性能，还可以指定要显示层的范围。下面是使用该命令后的典型输出结果。

```
LIST LAYERS 1 TO 4 IN REAL SET 1 FOR ELEMENT TYPE 1
TOTAL LAYERS = 4     LSYM = 1     LP1 = 0     LP2 = 0     EFS = .000E+00
NO.     ANGLE     THICKNESS     MAT
 --- ----- ---------- -------- ---------- ----------
 1        45.0            0.250          1
 2        -45.0           0.250          2
 3        -45.0           0.250          2
 4          45.0          0.250          1
 ---------------------------- ---------- ----------
 SUM OF THK      1.00
```

● Command：LAYPLOT

GUI：Utility Menu | Plot | Layered Elements

此命令功能为以卡片的形式图形显示层的叠合顺序，如图 6-4 所示。各层会以不同的颜色和截面线显示。

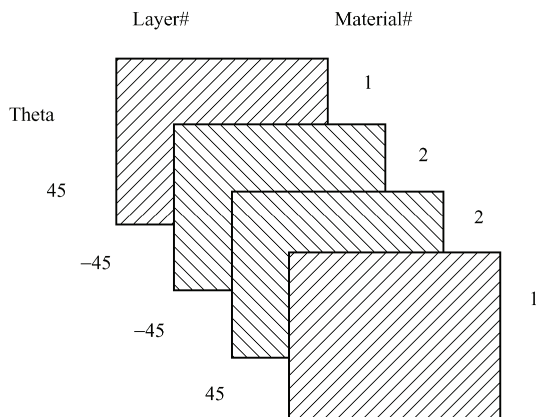


图 6-4　一个[45/-45/-45/45]叠层结果显示

● Command：SECPLOT

GUI：Main Menu | Proprocessor | Sections | Shell | Plot Section

此命令功能为以卡片的形式图形显示横截面上层的叠合顺序。

4）默认时，只有第 1 层（底层）的底面、最后一层（顶层）的顶面以及有最大失效值的层的结果数据被写入到结果文件，如果用户对所有层的结果数据都感兴趣，则应将单元的第 8 个关键字选项（KEYOPT（8））设置为 1，但这样可能会导致结果文件很大。

5）可以用 ESEL，S，LAYER 命令来选择特定层号的单元，如果某单元指定层为 0 厚

度，则不被选中。

6）在通用后处理器 POST1 中，可以使用 LAYER 命令来指定需要处理哪一层的计算结果；在时间历程后处理器 POST26 中，可以使用 LAYERP26 来指定需要处理哪一层的计算结果。可以使用 SHELL 命令来指定使用该层的顶面、底面或中面的结果。在 POST1 中，默认存储的是底层底面、顶层顶面和具有最大失效值的层的结果，而 POST26 存储的是第 1 层的结果。如果将单元的第 8 个关键字选项设置为 1，则存储所有层的计算结果。对于横向剪切应力，当 KEYOPT（8）=0 时，POST1 只能以线性变化的形式输出。

- Command：LAYER

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Options for Outp

Utility Menu｜List｜Results｜Options

- Command：LAYERP26

GUI：Main Menu｜TimeHist Postpro｜Define Variables

- Command：SHELL

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Options for Outp

Main Menu｜TimeHist Postpro｜Define Variables

Utility Menu｜List｜Results｜Options

7）在默认条件下，POST1 将在总体笛卡儿坐标系中显示所有结果，使用下列命令可将计算结果转换到其他坐标系中显示：

Command：RSYS

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Options for Outp

Utility Menu｜List｜Results｜Options

6.2 复合材料结构分析实例详解——复合材料层合板结构分析

6.2.1 问题描述

图 6-5 所示为一个复合材料梁及其横截面的结构示意图，该梁由 3 层板复合而成，每层板的材料参数见表 6.1，在其顶端承受弯矩 M=10N·m 的作用；梁的初始温度为 T_{ref}=0℃，将其均匀加热到温度 T=100℃，求梁中间层的应力、应变场分布及支反力。

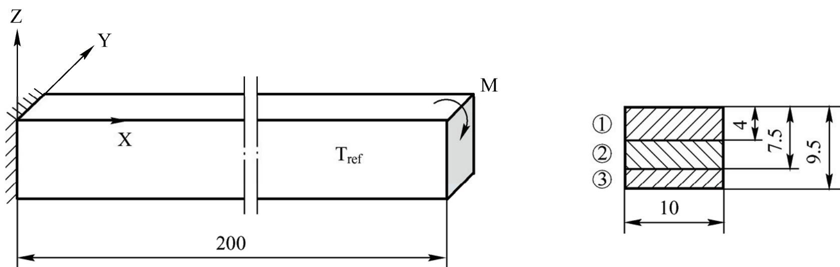


图 6-5 复合材料梁及其横截面结构示意图

表 6.1　梁的材料参数

参量 / 层数	EX/ GPa	PRXY	ALPX / $\times10^{-6}$ ℃$^{-1}$	ALPY / $\times10^{-6}$ ℃$^{-1}$
1	120	0.32	1.8	0.2
2	40	0.26	0.6	0.1
3	80	0.28	0.6	0.1

6.2.2 问题分析

该问题属于复合材料层合板结构分析问题。选择 SHELL281 壳单元建立平面模型进行求解，根据题意，在分析过程中对一端面上的节点施加全位移约束，将另一端面上的节点沿 Y 方向的转动位移耦合起来。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SHELL99 壳单元。

6.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 BENDING OF A COMPOSITE BEAM，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Shell，3D 8node 281，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 6-6 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

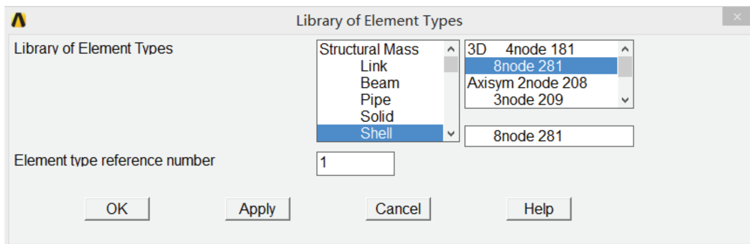


图 6-6　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 SHELL281 element type options 对话框，在 Storage of layer data K8 下拉菜单中选择 All layers，如图 6-7 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

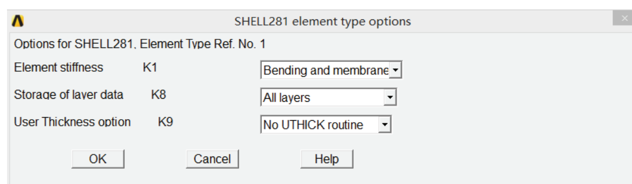


图 6-7 SHELL281 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 1.2E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.32，如图 6-8 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 1.8E-6，在 ALPY 输入栏中输入 2E-7，如图 6-9 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

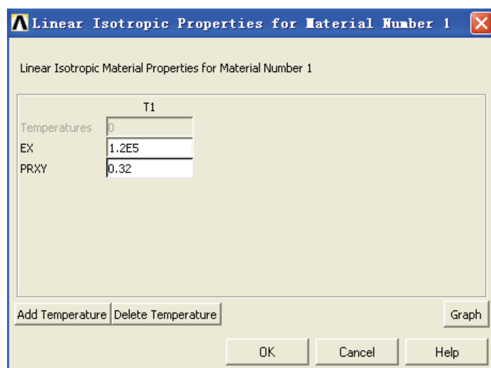


图 6-8 输入弹性模量和泊松比对话框

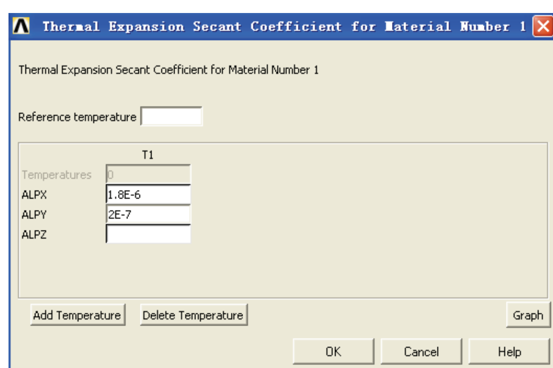


图 6-9 输入热膨胀系数对话框

4）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 0.4E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 2 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 0.6E-6，在 ALPY 输入栏中输入 0.1E-6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在 Define Material ID 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 3 对话框，在 EX 输入栏中输入 0.8E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.28，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 3 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 0.6E-6，在 ALPY 输入栏中输入 0.1E-6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框，参照图 6-10 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：可通过单击该对话框中的 Add Layer 按钮增加层数的输入栏。

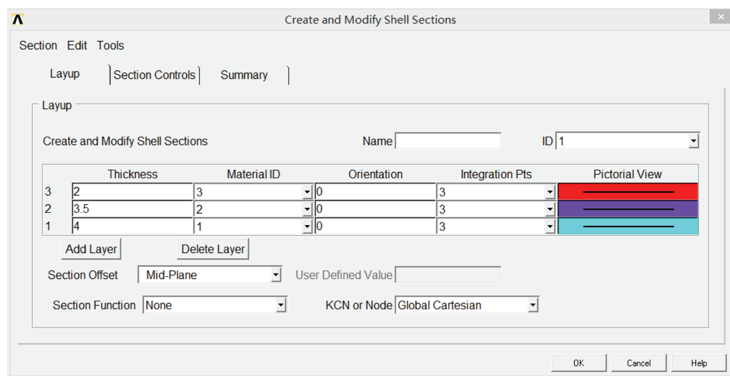


图 6-10　输入壳单元层信息对话框

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 LINE　Line numbers 和 AREA　Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段和面编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、200，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、10，如图 6-11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

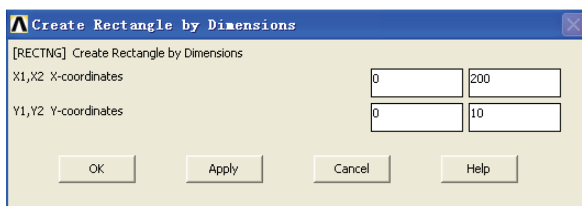


图 6-11　创建矩形面对话框

3）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 20，如图 6-12 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 L1、L3 划分为 20 等份。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，4，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

提示：以下两步操作为选择编号为 L2 的线段上的所有节点。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，如图 6-13a 所示，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines, all，在第 4 栏中选择 From Full，如图 6-13b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

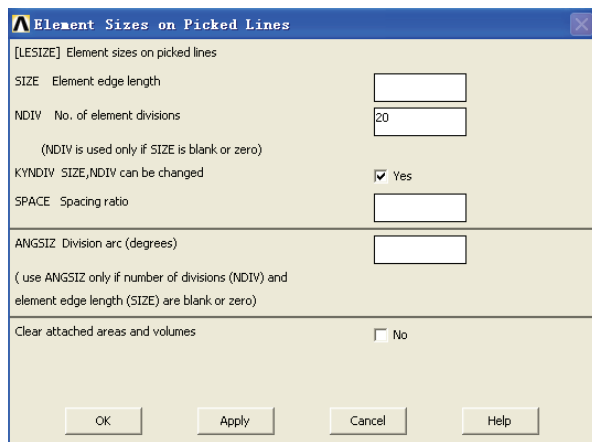


图 6-12 设置线段等分数对话框

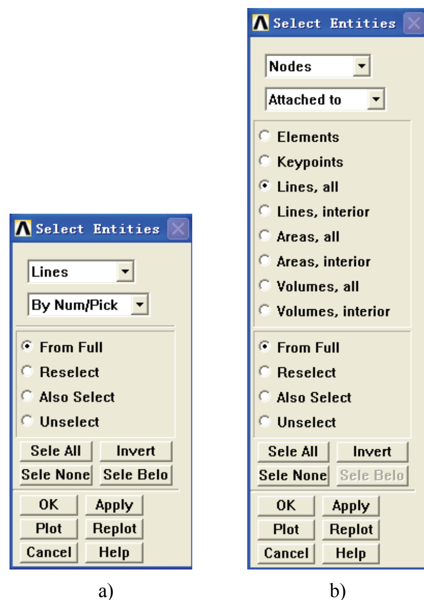


图 6-13 选择实体对话框

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Couple/Ceqn | Couple DOFs 命令，出现 Define Coupled DOFs 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Define Coupled DOFs 对话框，在 NSET Set reference number 输入栏中输入 1，在 Lab Degree-of-freedom label 下拉菜单中选择 ROTY，如图 6-14 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

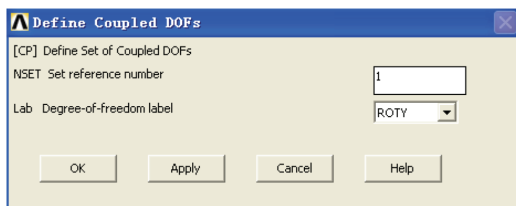


图 6-14 耦合节点位移对话框

10）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

11）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 6-15 所示。

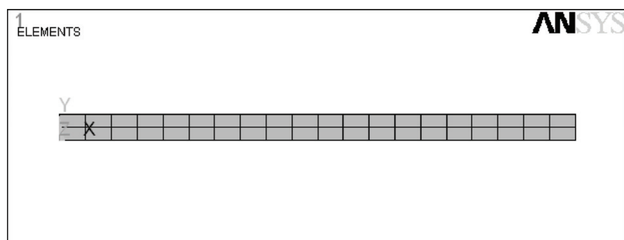


图 6-15 网格划分结果显示

12）选择 Utility Menu | Plot | Layered Elements 命令，出现 Plot Layer Elem 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Plot Layered Element Stacking 对话框，在 IEL Element no. for display 输入栏中输入 1，在 LAYR1, LAYR2 Range of layers 输入栏中输入 1、3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将图形显示叠层信息，如图 6-16 所示。

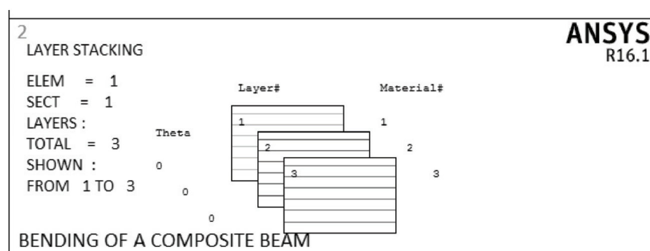


图 6-16 叠层信息结果显示

13）选择 Utility Menu | List | Elements | Layered Elements 命令，出现 List Layered Elements 对话框，在 Layered element to be listed 输入栏中输入 1，在 LAYR1, LAYR2 Range of layers 输入栏中输入 1、3，在 Mplab2 2nd mater prop to list 下拉菜单中选择 Therm expan ALPX，其余选项采用默认设置，如图 6-17 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将列表

显示叠层信息，如图 6-18 所示。

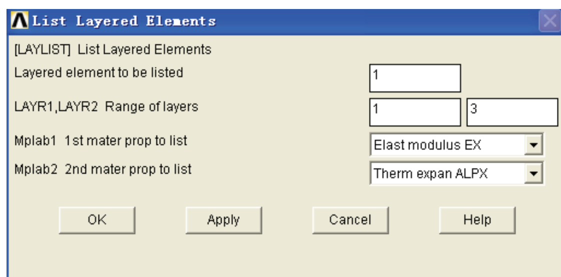


图 6-17 列表显示叠层信息对话框

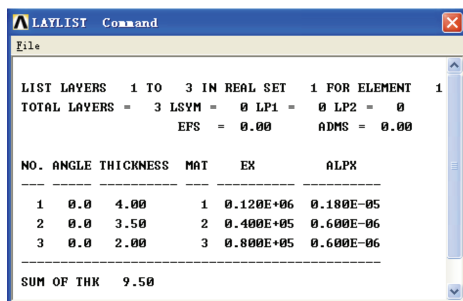


图 6-18 叠层信息结果显示

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：上述两步操作为选择编号为 L4 的线段上的所有节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 6-19 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在所选节点上施加位移约束。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 200，在第 5 栏中选择 From Full，如图 6-20a 所示，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 5，在第 5 栏中选择 Reselect，如图 6-20b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

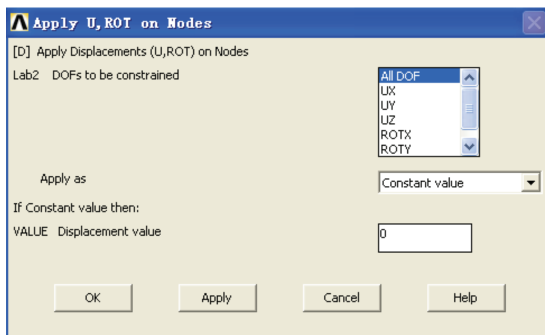
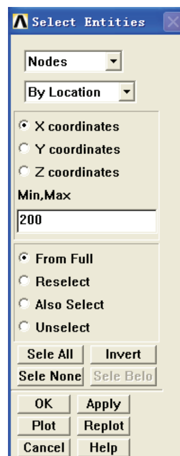
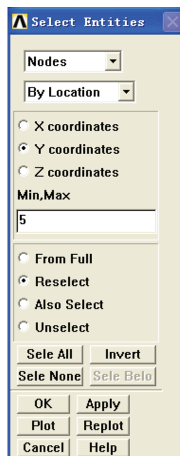


图 6-19　施加位移约束对话框



a)



b)

图 6-20　根据坐标值选择节点

提示：选择 X 坐标值为 200、Y 坐标值为 5 的节点。

7）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，如图 6-21 所示，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NC，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，如图 6-22 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

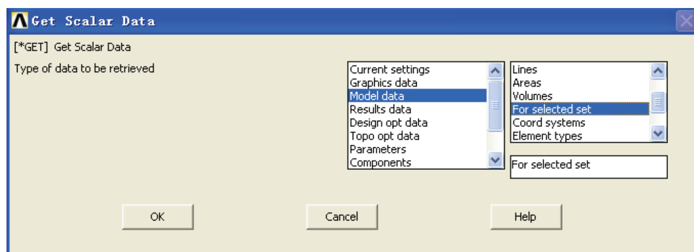


图 6-21　获取参量信息对话框

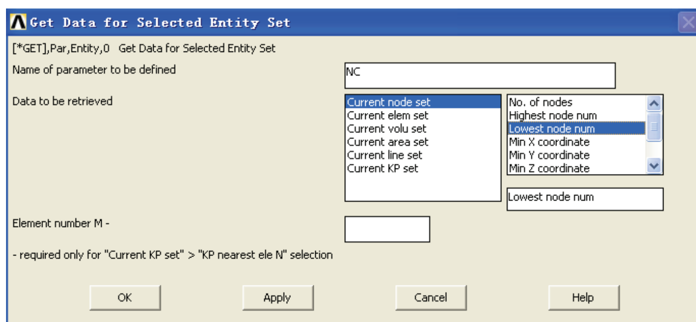


图 6-22　获取已选参量信息对话框

提示：获取 X 坐标值为 200、Y 坐标值为 5 的节点编号并将其存储到变量 NC 中。第 6）、7）步的操作过程可用 NC=NODE（200，5，0）命令代替。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉菜单中选择 MY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入 1E4，如图 6-23 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

注意：由于建模过程中长度单位采用 mm，因此力偶矩的单位应为 N • mm。

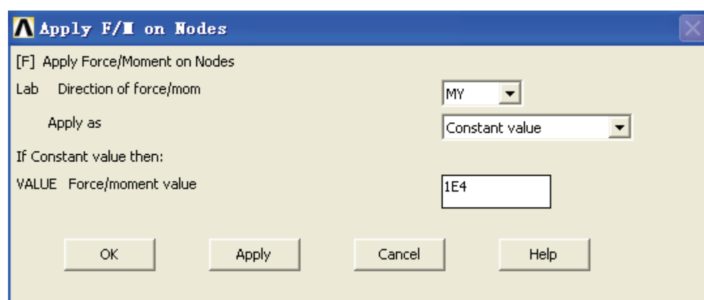


图 6-23 施加集中力偶矩载荷对话框

9）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

10）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Temperature | Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 100，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

12）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6. 查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Output 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LATER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 2，其余选项采用默认设置，如图 6-24 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取最终的求解结果。



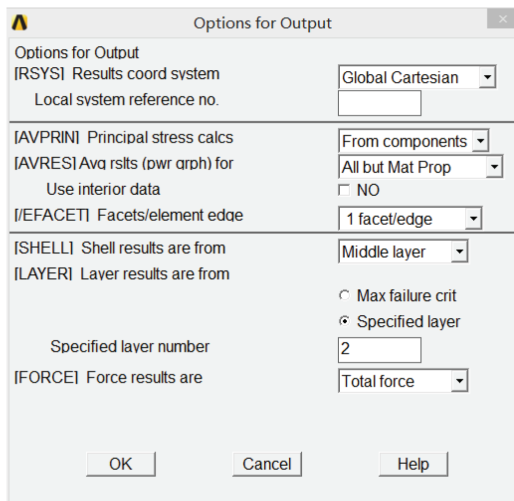


图 6-24　输出选项设置对话框

3）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF Solution｜Z-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-25 所示的 Z 方向位移等值线图。

4）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF Solution｜Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-26 所示的合位移等值线图。

提示：输出位移的单位为 mm。

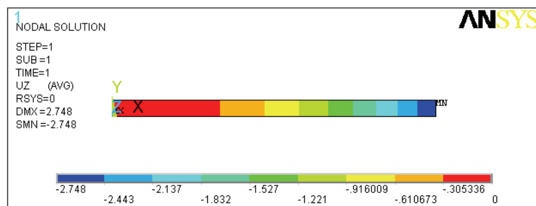


图 6-25　Z 方向位移等值线图

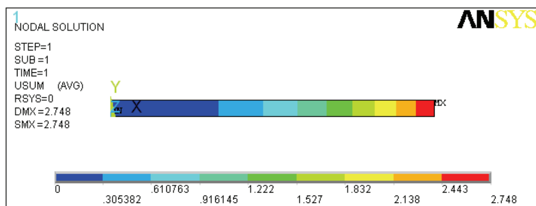


图 6-26　合位移等值线图

5）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜DOF Solution｜Rotation vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-27 所示的总转动位移等值线图。

6）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution｜Stress｜X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-28 所示的 X 方

向应力等值线图。

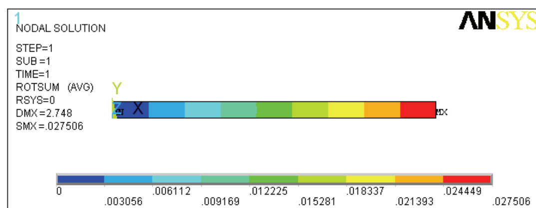


图 6-27　总转动位移等值线图

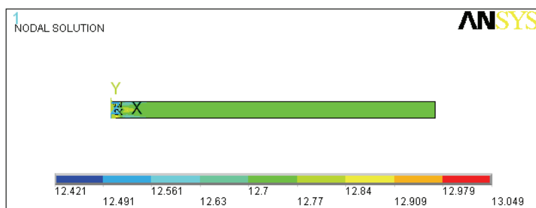


图 6-28　X 方向应力等值线图

提示：输出应力的单位为 MPa。

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-29 所示的 Y 方向应力等值线图。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-30 所示的等效应力等值线图。

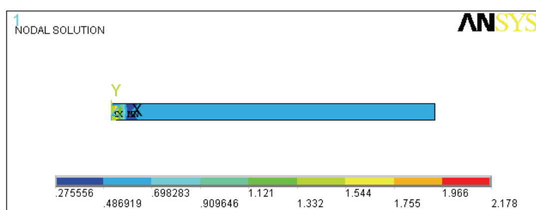


图 6-29　Y 方向应力等值线图

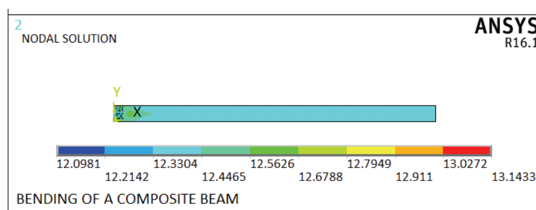
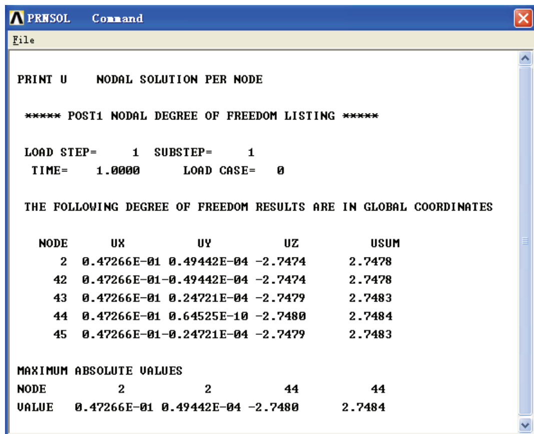


图 6-30　等效应力等值线图

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 200，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示自由边界上所有节点的位移求解结果，如图 6-31 所示。

11）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示自由边界上所有节点的应力求解结果，如图 6-32 所示。



```
PRNSOL  Command
File

PRINT U    NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

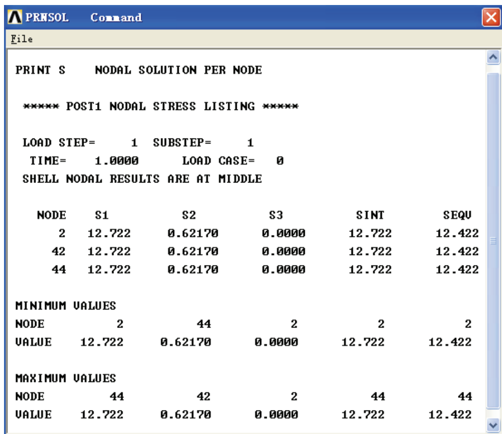
 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

   NODE      UX          UY          UZ          USUM
      2  0.47266E-01 0.49442E-04 -2.7474      2.7478
     42  0.47266E-01-0.49442E-04 -2.7474      2.7478
     43  0.47266E-01 0.24721E-04 -2.7479      2.7483
     44  0.47266E-01 0.64525E-10 -2.7480      2.7484
     45  0.47266E-01-0.24721E-04 -2.7479      2.7483

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE          2           2          44          44
VALUE   0.47266E-01 0.49442E-04 -2.7480      2.7484
```

图 6-31　列表显示自由边界上所有节点位移



```
PRNSOL  Command
File

PRINT S    NODAL SOLUTION PER NODE

 ***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0
 SHELL NODAL RESULTS ARE AT MIDDLE

   NODE     S1          S2          S3          SINT        SEQU
      2   12.722     0.62170     0.0000      12.722      12.422
     42   12.722     0.62170     0.0000      12.722      12.422
     44   12.722     0.62170     0.0000      12.722      12.422

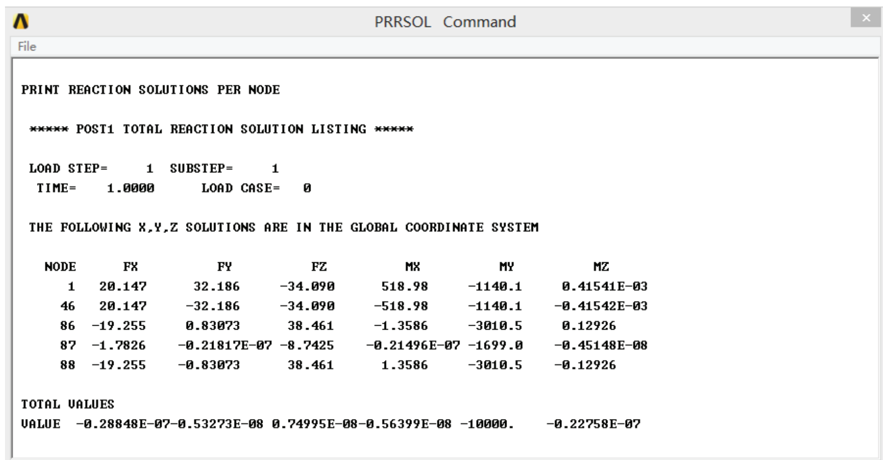
MINIMUM VALUES
NODE          2          44           2           2           2
VALUE    12.722     0.62170     0.0000      12.722      12.422

MAXIMUM VALUES
NODE         44          42           2          44          44
VALUE    12.722     0.62170     0.0000      12.722      12.422
```

图 6-32　列表显示自由边界上所有节点等效应力

12）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Main Menu｜General Postproc｜List Results｜Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab　Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示支反力结果，如图 6-33 所示。



```
PRRSOL  Command
File

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

 ***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

   NODE     FX          FY          FZ          MX          MY          MZ
      1   20.147      32.186     -34.090      518.98     -1140.1      0.41541E-03
     46   20.147     -32.186     -34.090     -518.98     -1140.1     -0.41542E-03
     86  -19.255     0.83073      38.461     -1.3586     -3010.5      0.12926
     87  -1.7826    -0.21817E-07 -8.7425    -0.21496E-07 -1699.0     -0.45148E-08
     88  -19.255    -0.83073      38.461      1.3586     -3010.5     -0.12926

TOTAL VALUES
VALUE  -0.28848E-07-0.53273E-08 0.74995E-08-0.56399E-08 -10000.     -0.22758E-07
```

图 6-33　支反力求解结果显示

14）选择 Utility Menu｜File｜Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

✍ **试一试：** 如果复合材料梁由 4 层厚度均为 5mm 的板构成，且其端面承受均布载荷 P=10MPa 的作用，材料参数不变，求此时梁内部的应力场分布。

6.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                          ！定义工作文件名
/TITLE，BENDING OF A COMPOSITE BEAM          ！定义工作标题
```



```
/PREP7                                  ！进入前处理器
ET，1，SHELL281                         ！指定单元类型
KEYOPT，1，8，1                         ！设置单元关键字
MP，EX，1，1.2E5                        ！输入材料 1 性能参数
MP，PRXY，1，0.32
MP，ALPX，1，1.8E-6
MP，ALPY，1，0.2E-6
MP，EX，2，0.4E5                        ！输入材料 2 性能参数
MP，PRXY，2，0.26
MP，ALPX，2，0.6E-6
MP，ALPY，2，0.1E-6
MP，EX，3，0.8E5                        ！输入材料 3 性能参数
MP，PRXY，3，0.28
MP，ALPX，3，0.6E-6
MP，ALPY，3，0.1E-6
SECT, 1, SHELL                          ！设置壳单元层信息
SECDATA, 4, 1, 0.0, 3
SECDATA, 3.5, 2, 0.0, 3
SECDATA, 2, 3, 0.0, 3
SECOFFSET, MID
SECCONTROL
SECPLOT, 1

/PNUM，LINE，1                          ！显示线段编号
/PNUM，AREA，1                          ！显示面编号
RECTNG，0，200，0，10                   ！生成矩形面
LPLOT                                   ！显示线段
LSEL，S,,，1，3，2                      ！选择线段
LESIZE，ALL,,，20                       ！设置线段等分数
LSEL，S,,，2，4，2
LESIZE，ALL,,，2
ALLSEL                                  ！选择所有实体
AMESH，1                                ！对面进行网格划分
LSEL，S,,，2
NSLL，S，1                              ！选择线段上的所有节点
CP，1，ROTY，ALL                        ！耦合节点转动位移
ALLSEL
EPLOT                                   ！显示单元
LAYPLOT，1，1，3                        ！图形显示叠层信息
LAYLIST，1，1，3，EX，ALPX              ！列表显示叠层信息
SAVE
FINISH

/SOLU                                   ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                          ！指定分析类型
LPLOT
LSEL，S,,，4
NSLL，S，1
D，ALL，ALL                             ！施加位移约束
```

```
ALLSEL
NSEL，S，LOC，X，200                    ！选择节点
NSEL，R，LOC，Y，5                      ！二次选择节点
*GET，NC，NODE，，NUM，MIN              ！获取节点编号
F，NC，MY，1E4                          ！施加集中力偶矩载荷
ALLSEL
BFUNIF，TEMP，100                       ！施加均匀温度载荷
SOLVE                                   ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                  ！进入 POST1 后处理器
RSYS，0                                 ！在直角坐标系中显示结果
AVPRIN，0，0
SHELL，MID                              ！使用层的中面
AVRES，2
/EFACET，1
LAYER，2                                ！读取第 2 层求解结果
FORCE，TOTAL
SET，LAST                               ！读取最终求解结果
PLNSOL，U，Z                            ！绘制 Z 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，SUM                          ！绘制合位移场等值线图
PLNSOL，ROT，SUM                        ！绘制总转动位移场等值线图
PLNSOL，S，X                            ！绘制 X 方向应力场等值线图
PLNSOL，S，Y                            ！绘制 Y 方向应力场等值线图
PLNSOL，S，EQV                          ！绘制等效应力场等值线图
NSEL，S，LOC，X，200
PRNSOL，U，COMP                         ！列表显示节点位移求解结果
PRNSOL，S，COMP                         ！列表显示节点应力求解结果
ALLSEL
PRRSOL                                  ！列表显示支反力求解结果
FINISH
/EXIT，ALL                              ！退出 ANSYS
```

6.3 复合材料结构分析实例详解——层合板受压分析

6.3.1 问题描述

图 6-34 所示为一复合材料层合板及其横截面的结构示意图，该板由 4 层厚度为 t 的单元板复合而成，单元板的铺层方向为 0°、90°、90°、0°，单元板的材料性能参数见表 6.2。在层合板的顶面施加 P_0 均布载荷。求：

1）板内部的位移、应力场分布；

2）节点支反力；

3）对角线 OA 上各点位移和应力随距离的变化关系；

4）O 点垂直位移和等效应力随载荷的变化规律。

几何参数：a=2m；t=0.025m

载荷：P_0=6000Pa

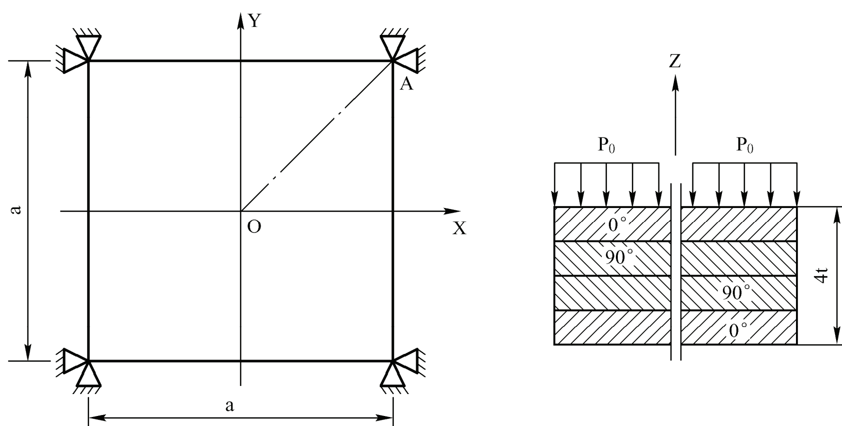


图 6-34 复合材料层合板及其横截面结构示意图

表 6.2 单元板材料性能参数

EX/ MPa	EY/ MPa	EZ/ MPa	GXY/ MPa	GYZ/ MPa	GXZ/ MPa	PRXY	PRYZ	PRXZ
1250	300	300	50	20	50	0.25	0.25	0.01

6.3.2 问题分析

根据对称性，取复合材料板的 1/4 建立几何模型，并选择 SOLID185 单元建立 3D 有限元模型进行求解。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 SOLID46 实体单元。

6.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 SIMPLY SUPPORTED LAMINATED PLATE UNDER PRESSURE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 8 node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 6-35 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

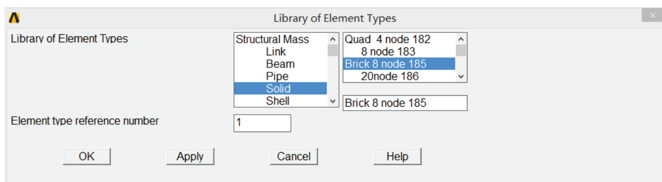


图 6-35　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 SOLID185 element type options 对话框，在 Layer construction　K3 下拉菜单选择 Layered solid，在 Storage of layer data　K8 下拉菜单中选择 All layers，其余选项采用默认设置，如图 6-36 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

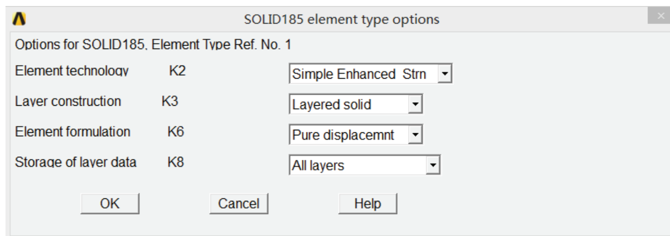


图 6-36　SOLID185 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Orthotropic 选项，出现 Linear Orthotropic Material Properties for Material Number 1 对话框，参照图 6-37 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

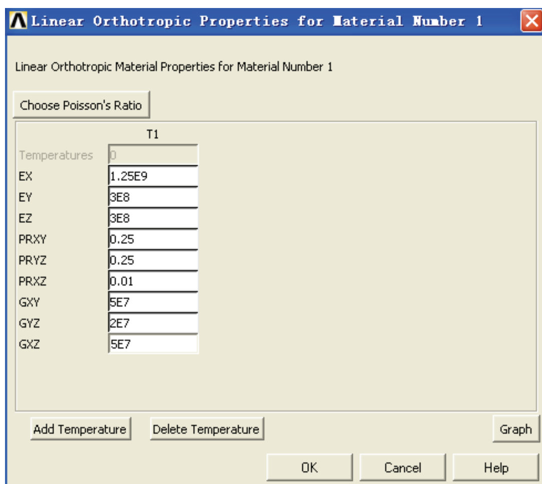


图 6-37　输入材料性能参数对话框

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框，参照图 6-38 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

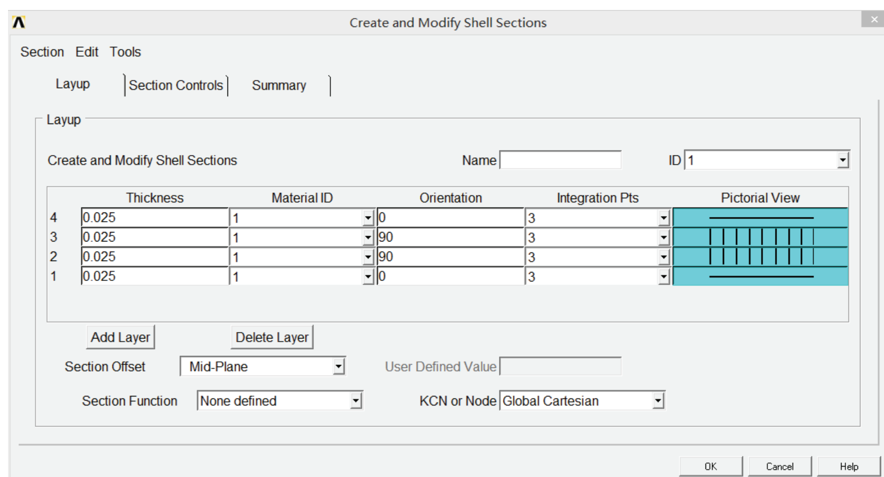


图 6-38　输入单元层信息对话框

提示：可通过单击该对话框中的 Add Layer 按钮增加层数的输入栏。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 LINE　Line numbers 和 AREA　Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示线段和面的编号。

2）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，如图 6-39 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

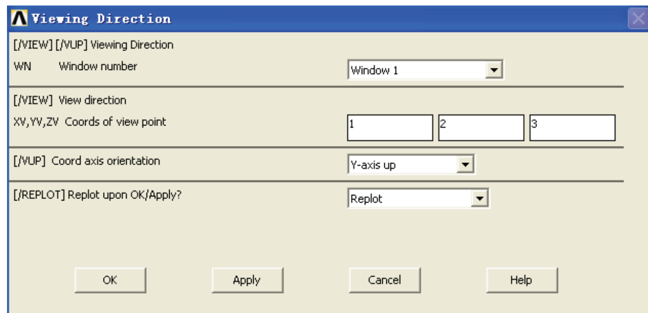


图 6-39　视图显示方向设置对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、1，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、1，在 Z1,Z2　Z-coordinates 输入栏中分别输入 0、0.1，如图 6-40 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

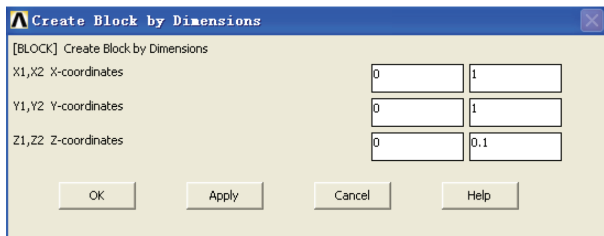
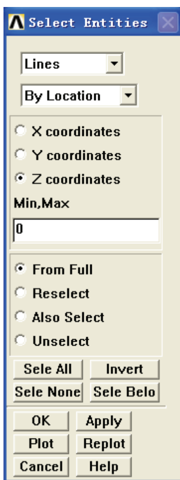


图 6-40　生成长方体对话框

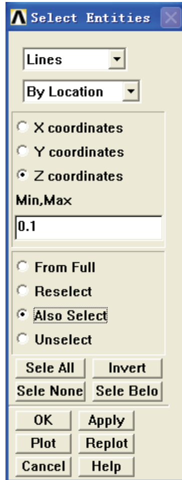
4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，如图 6-41a 所示，单击 Apply 按钮，在 Min,Max 输入栏中输入 0.1，在第 5 栏中选择 Also Select，如图 6-41b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择中点 Z 坐标值为 0 及 0.1 的所有线段。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 20，如图 6-42 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a)



b)

图 6-41　选择实体对话框

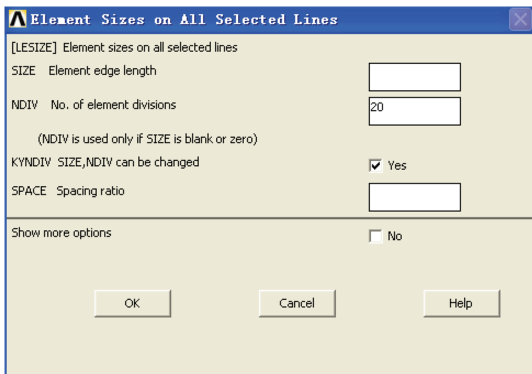


图 6-42　线段单元尺寸设置对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单

击 Invert 按钮，单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

提示：选择除中点 Z 坐标值为 0 及 0.1 的线段之外的所有线段。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | All Lines 命令，出现 Element Sizes on All Selected Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选线段进行 3 等分。

8）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

10）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 6-43 所示。

11）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Viewing Control 命令，开启曲线显示控制。

12）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 0、0、1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu | Plot | Layered Elements 命令，出现 Plot Layer Elem 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Plot Layered Element Stacking 对话框，在 EL Element no. for display 输入栏中输入 1，在 LAYR1, LAYR2 Range of layers 输入栏中输入 1、4，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将图形显示叠层信息，如图 6-44 所示。

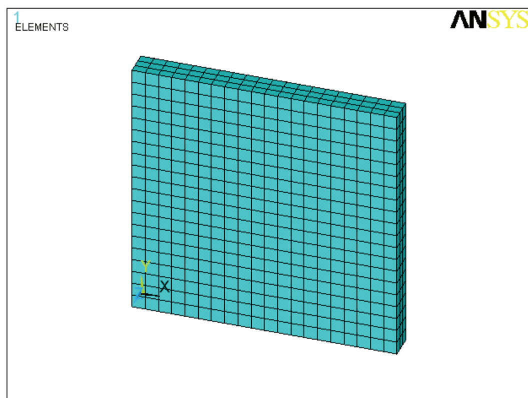


图 6-43 网格划分结果显示

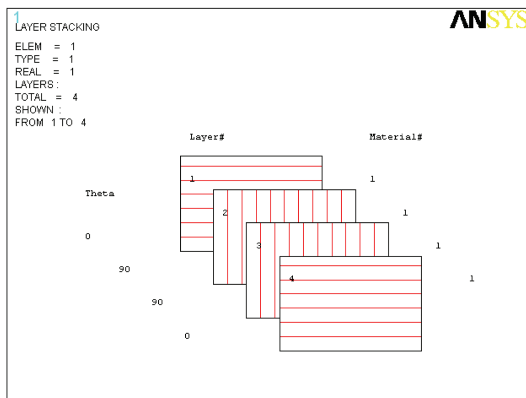


图 6-44 叠层信息结果图形显示

14）选择 Utility Menu | List | Elements | Layered Elements 命令，出现 List Layered Elements 对话框，在 Layered element to be listed 输入栏中输入 1，在 LAYR1, LAYR2 Range of layers 输入栏中输入 1、4，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将列表显示叠层信息，如图 6-45 所示。

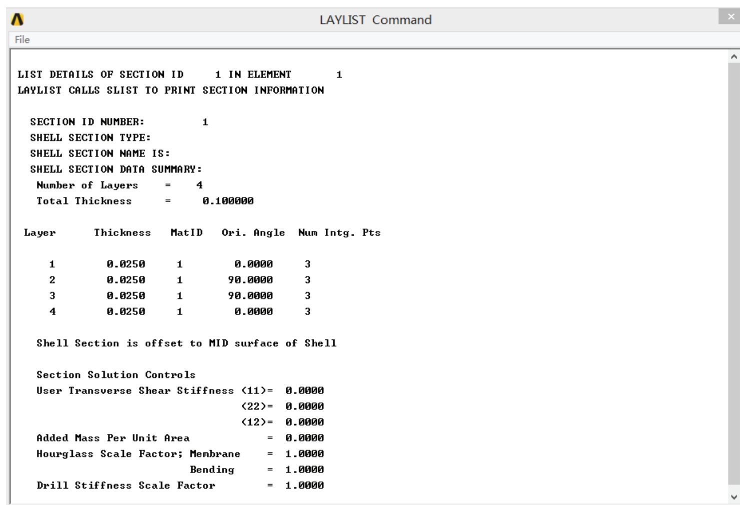


图 6-45　叠层信息结果列表显示

15）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV　Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol'n Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，参照图 6-46 所示对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

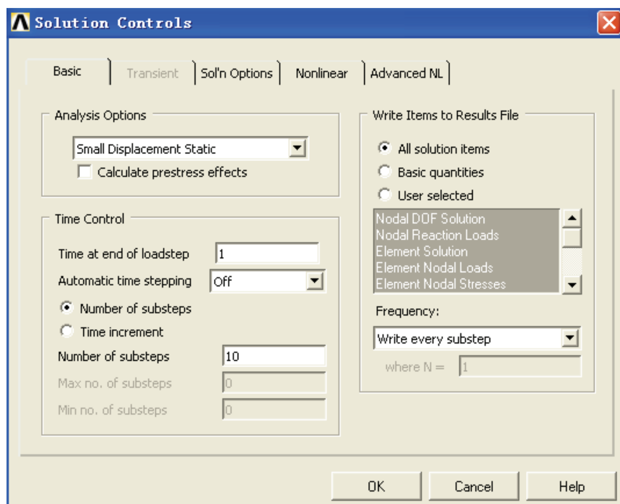


图 6-46　求解控制基本选项设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 0 的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 X-axis，如图 6-47 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

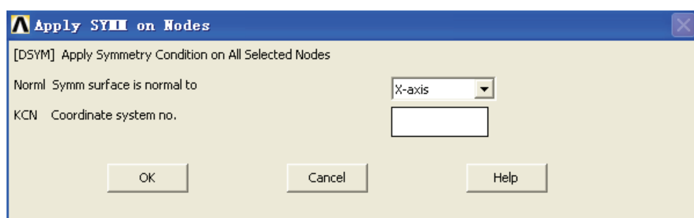


图 6-47　施加对称位移约束对话框

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Y 坐标值为 0 的所有节点。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 Y-axis，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 1，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 1，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X、Y 坐标值都为 1 的所有节点。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，如图 6-48 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinates，

在 Min,Max 输入栏中输入 0.1，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 Z 坐标值为 0.1 的所有节点。

10）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 6000，如图 6-49 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

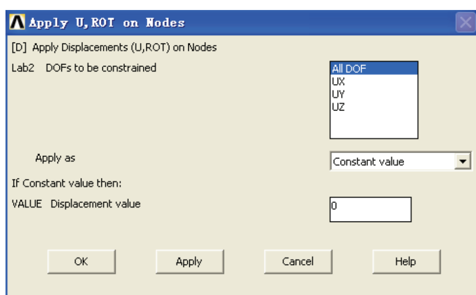


图 6-48 施加位移约束对话框

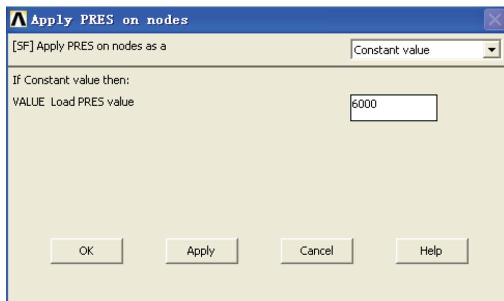


图 6-49 施加压力载荷对话框

提示：在所选节点上施加压力载荷。

11）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

12）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Output 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LAYER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 1，其余选项采用默认设置，如图 6-50 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

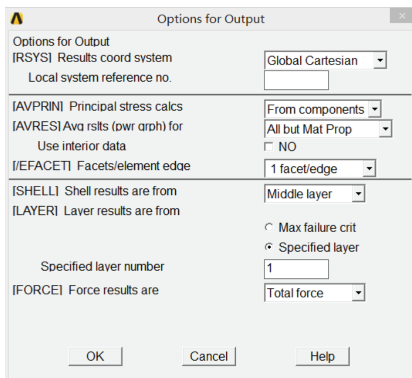


图 6-50 输出选项设置对话框

2）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令，读取最终的求解结果。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be

contoured 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-51 所示的合位移等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-52 所示的等效应力等值线图。

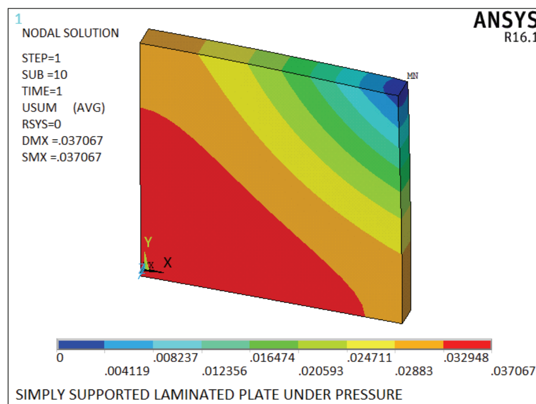


图 6-51 合位移等值线图

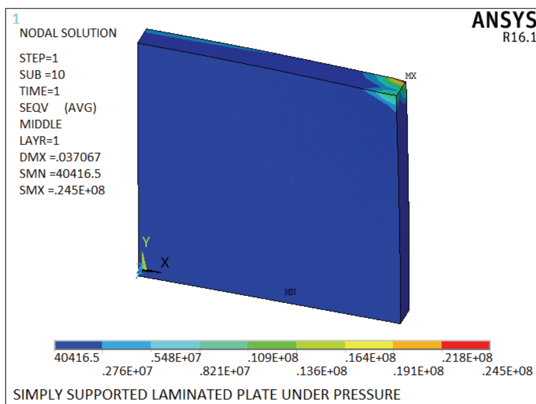


图 6-52 等效应力等值线图

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

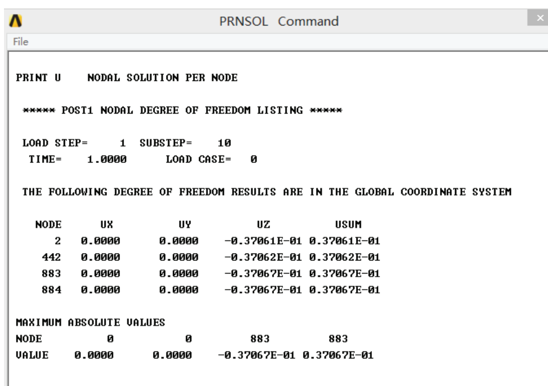
提示：选择 X、Y 坐标值都为 0 的所有节点。

6）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，在 Item to be listed 列表框中选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示板中心线上所有节点的位移求解结果，如图 6-53 所示。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 1，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 1，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X、Y 坐标值都为 1 的所有节点。

8）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示支反力结果，如图 6-54 所示。


```
PRINT U    NODAL SOLUTION PER NODE

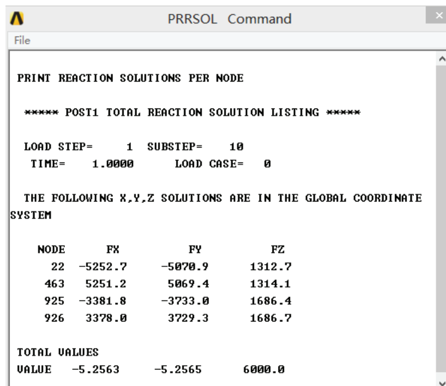
 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=    10
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

   NODE      UX          UY          UZ          USUM
      2   0.0000      0.0000     -0.37061E-01 0.37061E-01
    442   0.0000      0.0000     -0.37062E-01 0.37062E-01
    883   0.0000      0.0000     -0.37067E-01 0.37067E-01
    884   0.0000      0.0000     -0.37067E-01 0.37067E-01

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE           0           0          883         883
VALUE     0.0000      0.0000     -0.37067E-01 0.37067E-01
```


```
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

 ***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=    10
  TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

 THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE
SYSTEM

    NODE       FX          FY          FZ
      22   -5252.7     -5070.9      1312.7
     463    5251.2      5069.4      1314.1
     925   -3381.8     -3733.0      1686.4
     926    3378.0      3729.3      1686.7

 TOTAL VALUES
 VALUE    -5.2563     -5.2565      6000.0
```

图 6-53　板中心线上所有节点的位移求解结果显示　　　　图 6-54　节点支反力结果显示

9）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Output 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LAYER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 2，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-55 所示的等效应力等值线图。

11）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Output 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LAYER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 3，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-56 所示的等效应力等值线图。

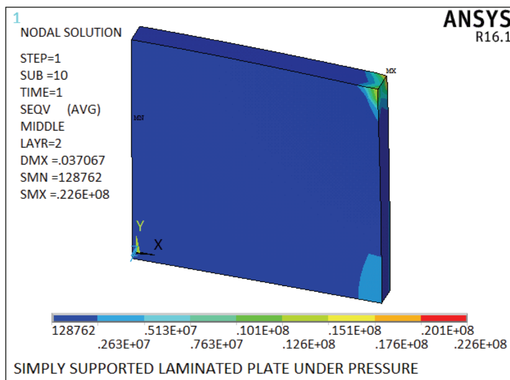


图 6-55　第 2 层等效应力等值线图

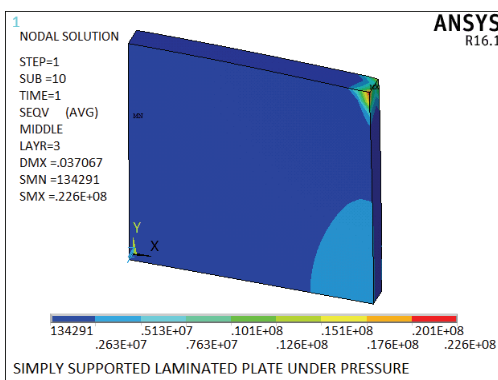


图 6-56　第 3 层等效应力等值线图

13）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Output 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LAYER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 4，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 6-57 所示的等效应力等值线图。

提示：下面的操作为定义路径并进行显示。

15）选择 Utility Menu | Select | Everythings 命令，选择所有实体。

16）选择 Main Menu | General Postproc | Options for Outp 命令，出现 Options for Output 对话框，在［SHELL］ Shell results are from 下拉菜单中选择 Middle layer，在［LAYER］ Layer results are from 选项中选择 Specified layer，在 Specified layer number 输入栏中输入 0，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

17）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | By Location 命令，出现 By Location 对话框，在 Name　Define Path Name:输入栏中输入 PATH1，其余选项采用默认设置，如图 6-58 所示。

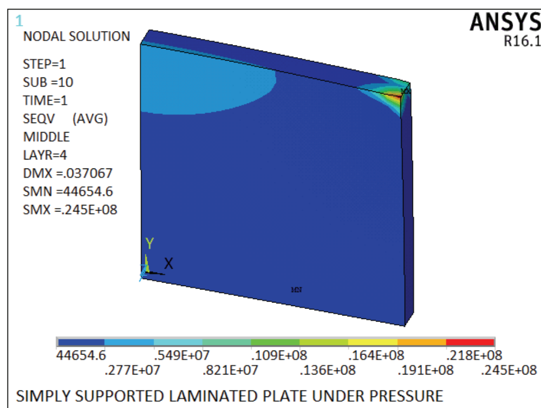


图 6-57　第 4 层等效应力等值线图

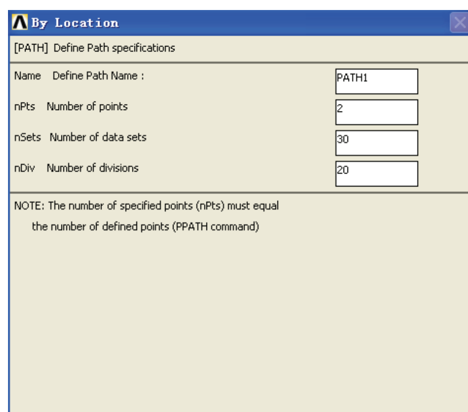


图 6-58　通过位置定义路径对话框

18）单击 OK 按钮，出现 By Location in Global Cartesian 对话框，在 NPT　Path point number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in Global CS 的 3 个输入栏中分别输入 0、0、0，在 CS　Interpolation CS 输入栏中输入 0，如图 6-59 所示，单击 OK 按钮，在 NPT　Path point number 输入栏中输入 2，在 X,Y,Z　Location in Global CS 的 3 个输入栏中分别输入 1、1、0.1，单击 OK 按钮，再单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | Path Status | Current Path 命令，ANSYS 将显示当前路径，如图 6-60 所示。

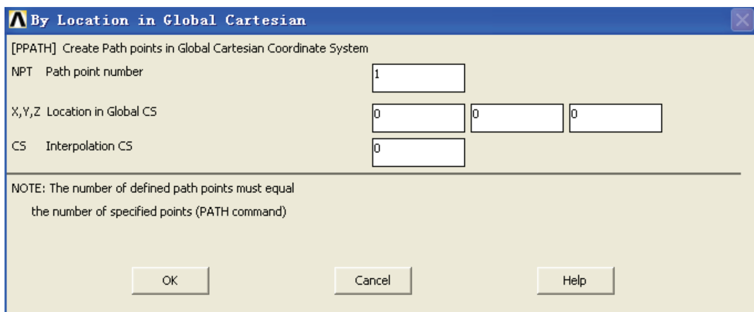


图 6-59　指定路径位置对话框

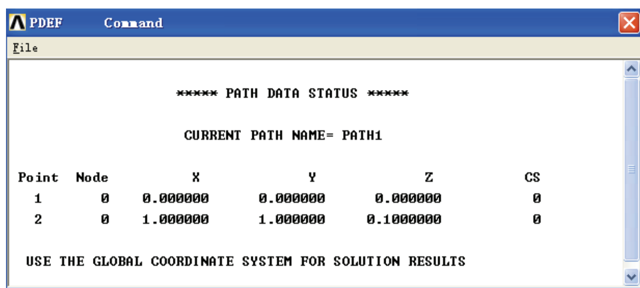


图 6-60　当前路径显示

20）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Map onto Path 命令，出现 Map Result Items onto Path 对话框，在 Lab User label for item 输入栏中输入 DIS，在 Item,Comp　Item to be mapped 列表框中选择 DOF solution，Translation USUM，在[AVPRIN] Eff NU for EQV strain 输入栏中输入 0，如图 6-61 所示。

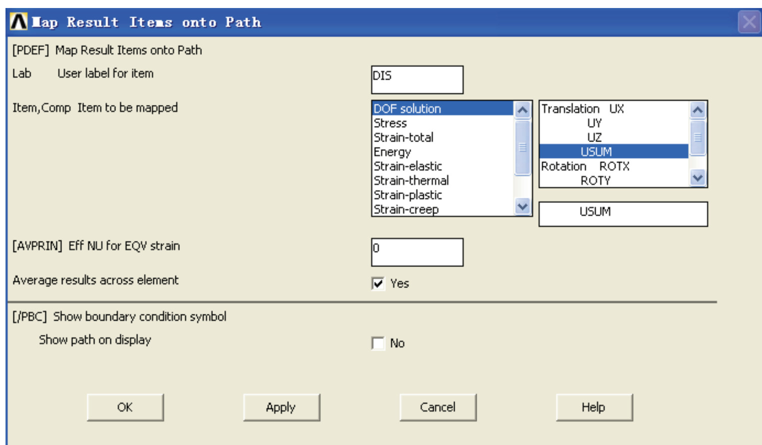


图 6-61　映射求解结果到路径上对话框

21）单击 Apply 按钮，在 Lab User label for item 输入栏中输入 EQUS，在 Item,Comp Item to be mapped 列表框中选择 Stress，von Mises SEQV，单击 OK 按钮关闭该对话框。

22）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes

Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］X-axis label 输入栏中输入 DISTANCE（m），在［/AXLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 DISPLACEMENT（m），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：定义坐标轴。

23）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 后面的 3 个输入栏中分别输入 0、0、0，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | On Graph 命令，出现 Plot of Path Items on Graph 对话框，在 Lab1-6 Path items to be graphed 列表框中选择 DIS，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示对角线 OA 上各节点位移同距离的变化关系曲线，如图 6-62 所示。

25）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］Y-axis label 输入栏中输入 STRESS（Pa），其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

26）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Plot Path Item | On Graph 命令，出现 Plot of Path Items on Graph 对话框，在 Lab1-6 Path items to be graphed 列表框中选择 EQUS，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示对角线 OA 上各节点等效应力同距离的变化关系曲线，如图 6-63 所示。

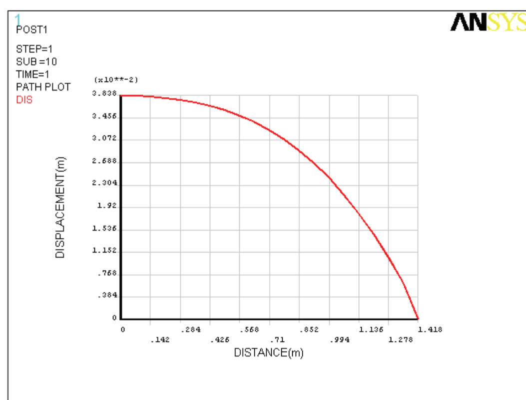


图 6-62　对角线上各节点位移同距离的变化关系

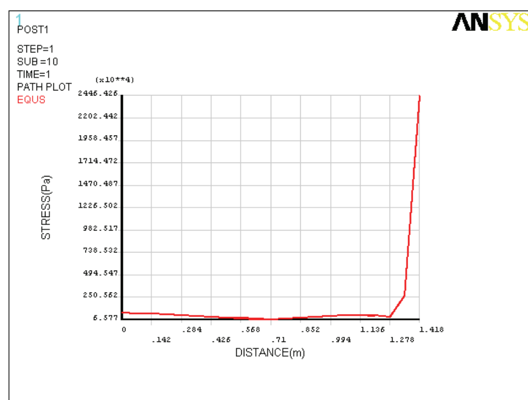


图 6-63　对角线上各节点等效应力同距离的变化关系

提示：进入/POST26 后处理器，定义时间历程变量并进行显示。

27）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Define Variables 命令，出现 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，选择 Element results 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Elemental 拾取菜单，在输入栏中输入 801，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 442，单击 OK 按钮，出现 Define Element Results Variable 对话框，参照图 6-64 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

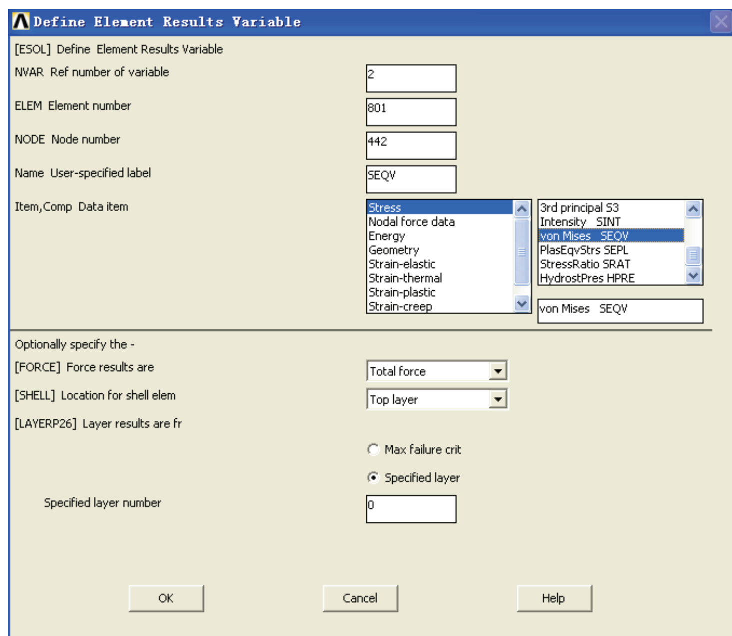


图 6-64　定义时间历程变量对话框

28）在 Defined Time-History Variables 对话框中单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variable 对话框，单击 Nodal DOF result 单选按钮，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 拾取菜单，在输入栏中输入 442，单击 OK 按钮，出现 Define Nodal Data 对话框，参照图 6-65 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

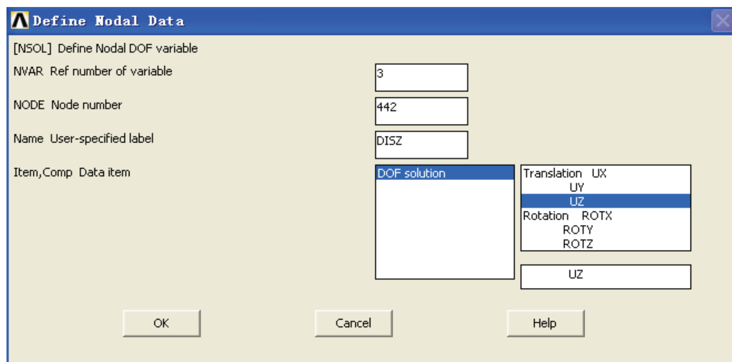


图 6-65　定义节点变量对话框

29）单击 Defined Time-History Variables 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

30）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Math Operations | Multiply 命令，出现 Multiply Time-History Variables 对话框，在 IR　Reference number for result 输入栏中输入 4，在 FACTA　1st Factor 输入栏中输入 1E-6，在 IA　1st Variable 输入栏中输入 2，如图 6-66 所示，单击 Apply 按钮，在 IR　Reference number for result 输入栏中输入 5，在 FACTA　1st Factor 输入栏中输入 6，在 IA　1st Variable 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

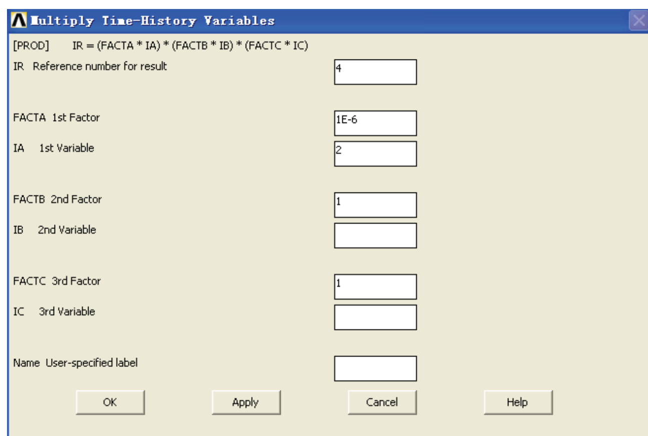


图 6-66　变量相乘操作对话框

31）选择 Main Menu｜TimeHist Postpro｜Settings｜Graph 命令，出现 Graph Settings 对话框，在［XVAR］ X-axis variable 选项中选择 Single variable，在 Single variable no.输入栏中输入 5，其余选项采用默认设置，如图 6-67 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

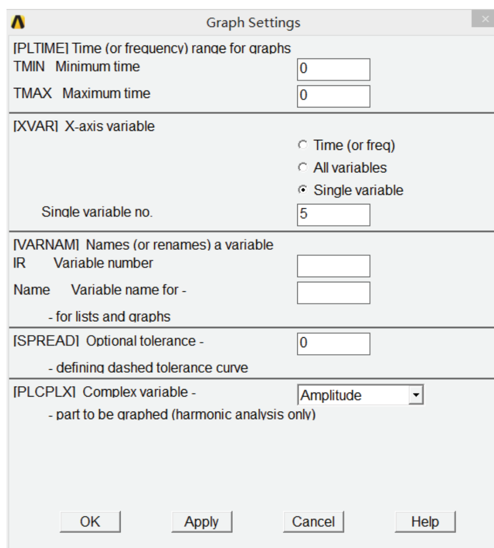


图 6-67　曲线设置对话框

32）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Style｜Graphs｜Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］X-axis label 输入栏中输入 PRESSURE（KPa）；在［/AXLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 EQUIVALENT STRESS（MPa）；在［/XRANGE］ X-axis range 选项中选择 Specified range，在 XMIN,XMAX　Specified X range 的两个输入栏中分别输入 0、6.4；在［/YRANGE］Y-axis range 选项中选择 Specified range，在 YMIN,YMAX　Specified Y range 的两个输入栏中分别输入 0、0.44；在 NDIV　Number of X-axis divisions 输入栏中输入 10；在 NDIV　Number of Y-axis divisions 输入栏中输入 10，其余选项采用默认设置，如图 6-68 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



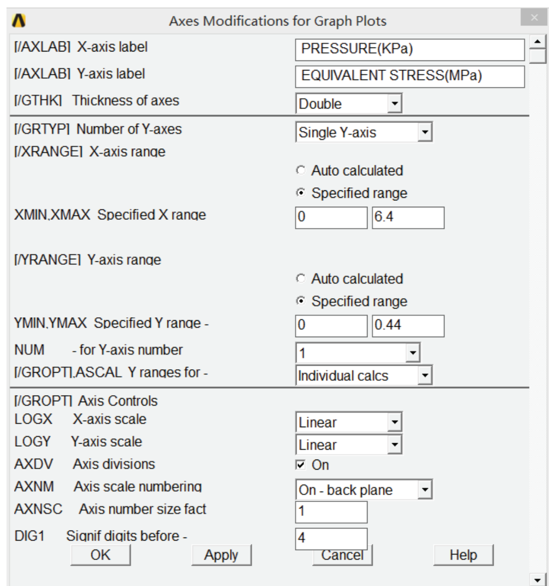


图 6-68　坐标轴设置对话框

33）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示板中心点等效应力随载荷的变化规律曲线，如图 6-69 所示。

34）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Graphs | Modify Axes 命令，出现 Axes Modifications for Graph Plots 对话框，在［/AXLAB］X-axis label 输入栏中输入 PRESSURE（KPa）；在［/AXLAB］ Y-axis label 输入栏中输入 DISPLACEMENT（m）；在［/XRANGE］ X-axis range 选项中选择 Auto calculated；在［/YRANGE］ Y-axis range 选项中选择 Auto calculated，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

35）选择 Main Menu | TimeHist Postpro | Graph Variables 命令，出现 Graph Time-History Variables 对话框，在 NVAR1　1st variable to graph 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示板中心点垂直位移随载荷的变化规律曲线，如图 6-70 所示。

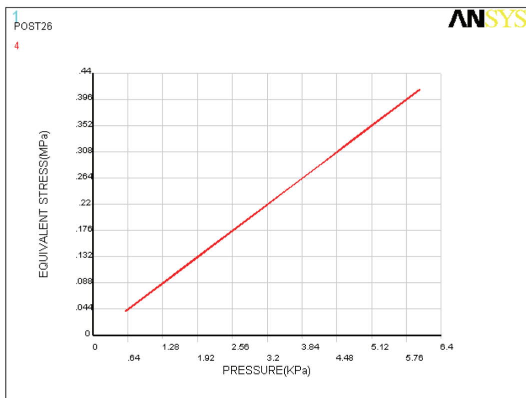


图 6-69　中心点等效应力随载荷的变化规律曲线

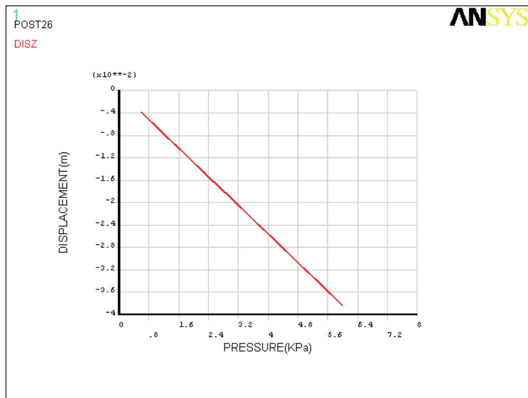


图 6-70　中心点垂直位移随载荷的变化规律曲线

36）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：如果将单元板的铺层方向改变为 0、45、45、0，计算结果和本例将有何不同？如果各单元板均为匀质板，即各个方向的材料性能相同，计算结果会出现什么变化？

6.3.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE2                                ！定义工作文件名
/TITLE，SIMPLY SUPPORTED LAMINATED PLATE UNDER PRESSURE
                                                   ！定义工作标题
/PREP7                                             ！进入前处理器
ET，1，SOLID185                                    ！指定单元类型
KEYOPT，1，2，0                                    ！定义单元关键字
KEYOPT，1，3，1
KEYOPT，1，6，0
KEYOPT，1，8，1
MP，EX，1，1250E6                                  ！定义材料性能参数
MP，EY，1，300E6
MP，EZ，1，300E6
MP，GXY，1，50E6
MP，GYZ，1，20E6
MP，GXZ，1，50E6
MP，PRXY，1，0.25
MP，PRYZ，1，0.25
MP，PRXZ，1，0.01
SECT，1，SHELL                                     ！设置层信息
SECDATA，0.025，1，0，3
SECDATA，0.025，1，90，3
SECDATA，0.025,1，90，3
SECDATA，0.025，1，0，3
SECOFFSET，MID
SECCONTROL

/PNUM，LINE，1                                     ！显示线段编号
/PNUM，AREA，1                                     ！显示面编号
/VIEW，1，1，2，3                                  ！设置视图显示方向
/VUP，1，Y
/REPLOT
BLOCK，0，1，0，1，0，0.1                          ！生成长方体
LSEL，S，LOC，Z，0                                 ！选择线段
LSEL，A，LOC，Z，0.1                               ！追加选择线段
LESIZE，ALL，，，20
LSEL，INVE                                         ！反向选择线段
LESIZE，ALL，，，3                                 ！设置线段等分数
ALLSEL                                             ！选择所有实体
VMESH，1                                           ！对体进行网格划分
EPLOT                                              ！显示单元
/VIEW，1，0，0，1
LAYPLOT，1，1，4                                   ！图形显示叠层信息
```

```
LAYLIST，1，1，4，EX，GXY                    ！列表显示叠层信息
/VIEW，1，1，2，3
SAVE
FINISH

/SOLU                                         ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                ！指定分析类型
TIME，1                                       ！指定求解终止时间
AUTOTS，OFF                                   ！关闭自动时间步长
NSUBST，10                                    ！定义求解子步数
OUTRES，ALL，ALL                              ！存储求解结果选项设置
NSEL，S，LOC，X，0                            ！选择节点
DSYM，SYMM，X                                 ！施加对称位移约束
NSEL，S，LOC，Y，0
DSYM，SYMM，Y
NSEL，S，LOC，X，1
NSEL，R，LOC，Y，1
D，ALL，ALL                                   ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，Z，0.1
SF，ALL，PRES，6000                           ！施加压力载荷
ALLSEL
SOLVE                                         ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                        ！进入 POST1 后处理器
AVPRIN，0，0
SHELL，MID                                    ！使用层的中面
AVRES，2
/EFACET，1
LAYER，1                                      ！读取第 1 层求解结果
FORCE，TOTAL
SET，LAST                                     ！读取最终求解结果
PLNSOL，U，SUM                                ！绘制合位移等值线图
PLNSOL，S，EQV                                ！绘制等效应力等值线图
NSEL，S，LOC，X
NSEL，R，LOC，Y
PRNSOL，U，COMP                               ！列表显示节点位移求解结果
NSEL，S，LOC，X，1
NSEL，R，LOC，Y，1
PRRSOL                                        ！列表显示支反力求解结果

LAYER，2                                      ！读取第 2 层求解结果
PLNSOL，S，EQV                                ！绘制等效应力等值线图
LAYER，3                                      ！读取第 3 层求解结果
PLNSOL，S，EQV
LAYER，4                                      ！读取第 4 层求解结果
PLNSOL，S，EQV

ALLSEL
LAYER，0
PATH，PATH1，2，30，20，                      ！定义路径
```

```
PPATH，1,，0，0，0                          ! 设置路径点
PPATH，2,，1，1，0.1
PDEF，STAT                                  ! 显示当前路径
AVPRIN，0,，
PDEF，DIS，U，SUM，AVG                      ! 将节点位移映射到路径上
/PBC，PATH,，0
AVPRIN，0,，
PDEF，EQUS，S，EQV，AVG                     ! 将节点应力映射到路径上
/PBC，PATH,，0
/AXLAB，X，DISTANCE(m)                      ! 指定 X 坐标轴标题
/AXLAB，Y，DISPLACEMENT(m)                  ! 指定 Y 坐标轴标题
PLPATH，DIS                                 ! 曲线显示路径
/AXLAB，Y，STRESS(Pa)
PLPATH，EQUS
FINISH

/POST26                                     ! 进入 POST26 后处理器
FORCE，TOTAL
SHELL，TOP
LAYERP26，0
ESOL，2，801，442，S，EQV，SEQV             ! 定义单元变量
NSOL，3，442，U，Z，DISZ                    ! 定义节点变量
PROD，4，2,,,,,，1E-6，1，1                 ! 变量相乘操作设置
PROD，5，1,,,,,，6，1，1
PLTIME，0，0
XVAR，5                                     ! 指定 X 坐标轴变量
SPREAD，0
PLCPLX，0
/AXLAB，X，PRESSURE(KPa)
/AXLAB，Y，EQUIVALENT STRESS(MPa)
/XRANGE，0，6.4                             ! 指定 X 坐标轴显示范围
/YRANGE，0，0.44                            ! 指定 Y 坐标轴显示范围
PLVAR，4                                    ! 曲线显示变量
/AXLAB，Y，DISPLACEMENT(m)
/XRANGE
/YRANGE
PLVAR，3
FINISH
/EXIT，ALL                                  ! 退出 ANSYS
```

6.4 复合材料结构分析实例详解——长纤维增强复合材料梁热膨胀分析

6.4.1 问题描述

图 6-71 所示为一长纤维增强的复合材料梁横截面示意图，该梁由两种基体 A、B 和刚

性纤维组成，总长度为 3m，一边简支固定，初始温度为 0℃，求将其升温到 100℃时梁的变形和内部应力分布。

A 基体材料参数如下。

弹性模量：E_A=36GPa；泊松比：ν_A=0.3；

B 基体材料参数如下。

弹性模量：E_B=6GPa；泊松比：ν_B=0.3；

纤维材料参数如下。

热膨胀系数：$\alpha_x=\alpha_y=\alpha_z$=2E-6

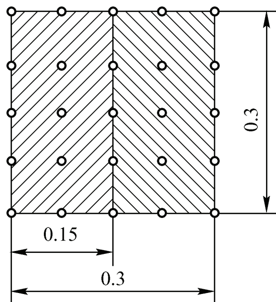


图 6-71 复合材料梁横截面示意图

6.4.2 问题分析

该问题属于复合材料结构分析问题。选取整体梁建立几何模型，选择 SOLID185 结构单元和 MPC184 多点约束单元进行求解。

6.4.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 THERMAL EXPANSION OF COMPOSITE BAR，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中依次输入 1、1、1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

技巧：可通过单击快捷菜单中的图标执行此命令。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 的第 1 个列表框中选择 Structural Solid，在第 2 个列表框中选择 Brick 8node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 6-72 所示。

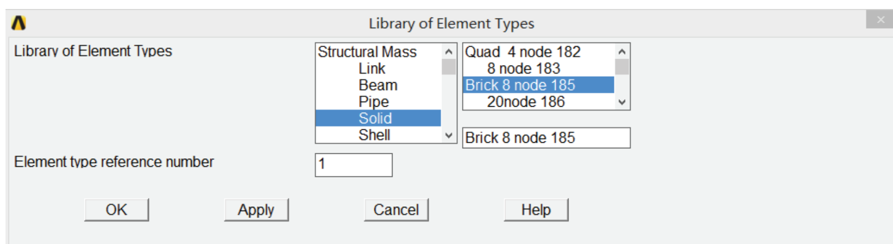


图 6-72 单元类型列表对话框

3）单击 Apply 按钮，在第 1 个列表框中选择 Structural Constraint，在第 2 个列表框中选择 Nonlinear　MPC184，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Element Types 对话框中选择 Type 2　MPC184，单击 Options 按钮，出现 MPC184 element type options 对话框，在 Element behavior　K1 列表框中选择 Rigid Beam，如图 6-73 所示，单击 OK 按钮，出现 MPC184 element type options 对话框，在 Reduction Method　K2 下拉菜单中选择 Lagrange Multiplier，单击 OK 按钮关闭该对话框。

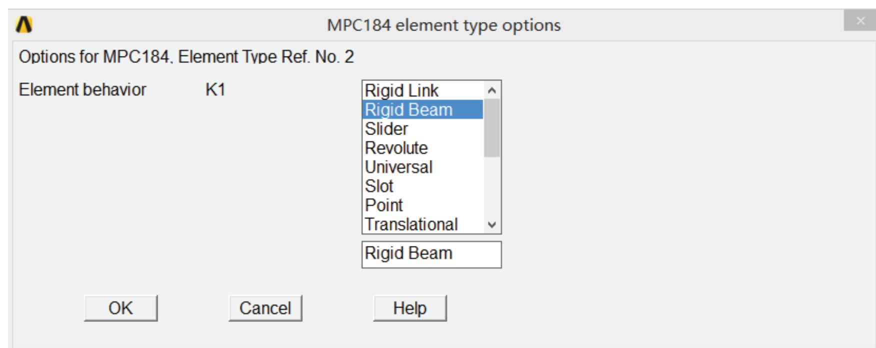


图 6-73　MPC184 单元关键字设置对话框

5）单击 Close 按钮，关闭 Element Types 对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3.6E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Material Models Defined 对话框中选择 Material Model Number 2，在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 6E9，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 3 对话框，单击 Add Temperature 按钮，参照图 6-74 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。



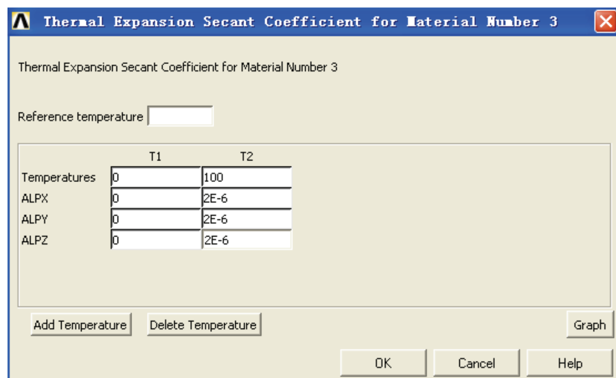


图 6-74　输入材料热膨胀系数对话框

7）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，如图 6-75 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

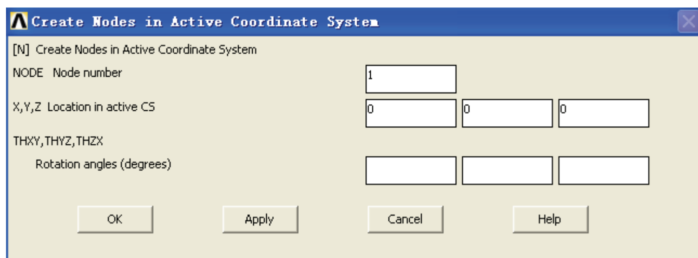


图 6-75　创建节点对话框

2）参照上一步的操作，分别在 ANSYS 显示窗口中创建以下节点：

2（3，0，0）；　3（0，0.075，0）；　4（3，0.075，0）；

5（0，0.15，0）；　6（3，0.15，0）；　7（0，0.225，0）；

8（3，0.225，0）；　9（0，0.3，0）；　10（3，0.3，0）

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］　Element type number 下拉选框中选择 2 MPC184，在［MAT］　Material number 下拉框中选择 3，如图 6-76 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 Apply 按钮；输入 3，4，单击 Apply 按钮；输入 5，6，单击 Apply 按钮；输入 7，8，单击 Apply 按钮；输入 9，10，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过节点直接生成单元。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，参照图 6-77 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

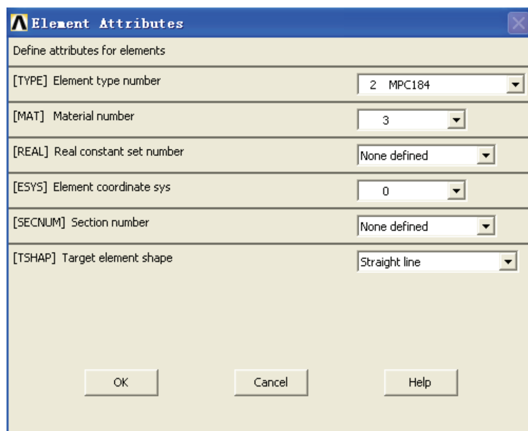


图 6-76　单元属性设置对话框

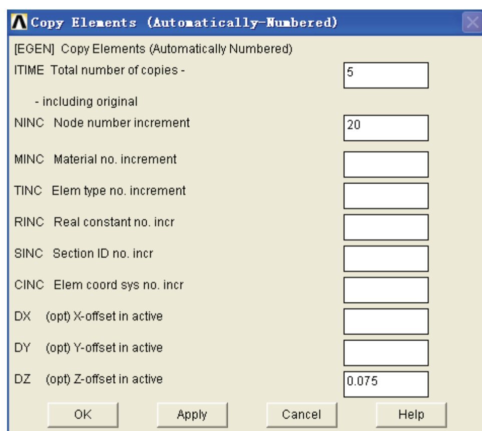


图 6-77　复制单元对话框

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Volumes | Block | By Dimensions 命令，出现 Create Block by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中依次输入 0，3，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中依次输入 0，0.3，在 Z1,Z2　Z-coordinates 输入栏中依次输入 0，0.15，单击 Apply 按钮；在 Z1,Z2　Z-coordinates 输入栏中依次输入 0.15，0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Glue | Volumes 命令，出现 Glue Volumes 菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

提示：将两个相互独立的体粘合在一起，使其具有共同的交面。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在 Min,Max 输入栏中输入 3，在第 5 栏中选择 Also Select，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择线段中点 X 坐标为 0 或 3 的所有线段。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 SIZE　Element edge length 输入栏中输入 0.075，如图 6-78 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：按 0.075m 对所选线段进行等分。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Lines，在第 2 个下拉选框中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 Invert 按钮，单击 Cancel 按钮关闭该菜单。

提示：选择除线段中点 X 坐标为 0 或 3 的线段以外的所有线段。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManuaSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 0.1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］ Element type number 下拉选框中选择 1 SOLID185，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

13）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

14）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

15）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［MAT］ Material number 下拉选框中选择 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Volumes | Free 命令，出现 Mesh Volumes 菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该菜单。

17）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口显示网格划分结果，如图 6-79 所示。

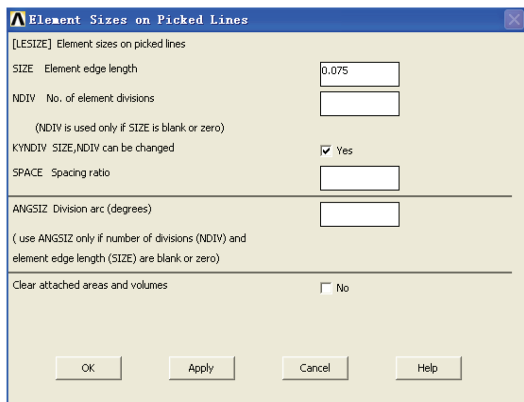


图 6-78 线段单元尺寸设置对话框

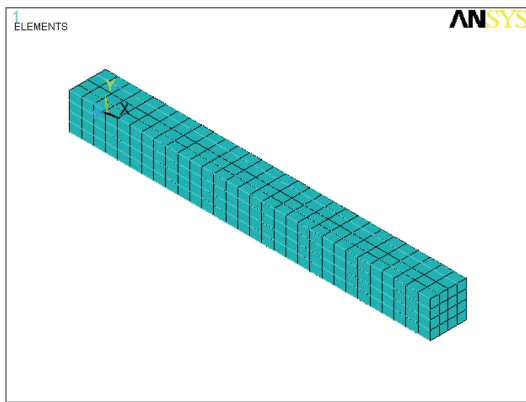


图 6-79 网格划分结果显示

18）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label Type of item to be merged 下拉菜单中选择 Nodes，如图 6-80 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

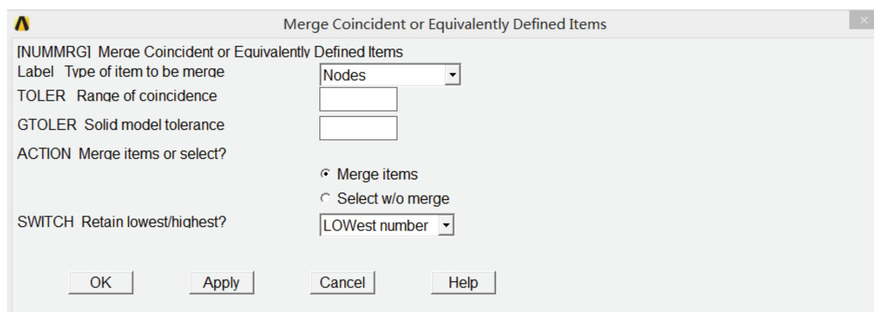


图 6-80 合并实体对话框

提示：合并同位置重复定义的节点。

19）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-1.db，保存上述操作过程。

5. 加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | Sol's Controls 命令，出现 Solution Controls 对话框，单击其上的 Basic 选项卡，参照图 6-81 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

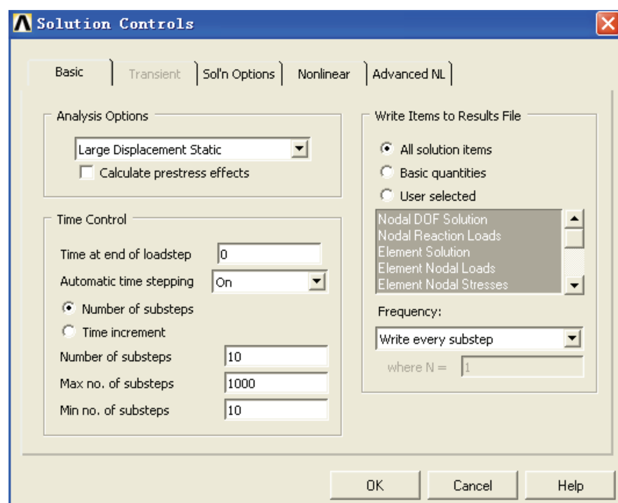


图 6-81 求解过程基本属性设置对话框

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 X 坐标为 0 的所有节点。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加位移约束。

5）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

注意：此操作为选择所有实体，不可以省略，否则将有部分单元和节点不参与计算。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Reference Temp 命令，出现 Reference Temperature 对话框，在［TREF］ Reference temperature 输入栏中输入 0，如图 6-82 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Settings | Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 100，如图 6-83 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

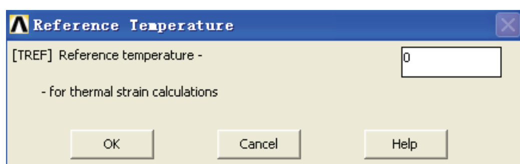


图 6-82 参考温度设置对话框

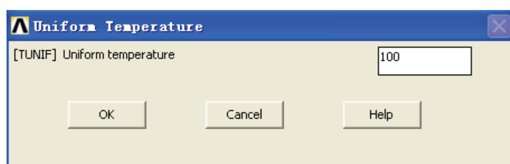


图 6-83 均匀温度载荷设置对话框

8）选择 Main Menu | Solution | Solve | Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框上的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

9）求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE3-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Read Results | Last Set 命令。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 Apply 按钮，ANSYS 显示窗口显示 X 方向的位移场等值线图，如图 6-84 所示。选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 Apply 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力场等值线图，如图 6-85 所示。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 1.5，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在第 3 栏中选择 Y coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0.15，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 Apply 按钮；在第 3 栏中选择 Z coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0.075，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该菜单。

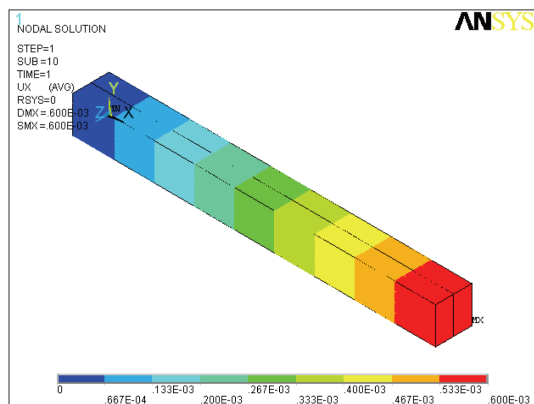


图 6-84　X 方向位移场等值线图

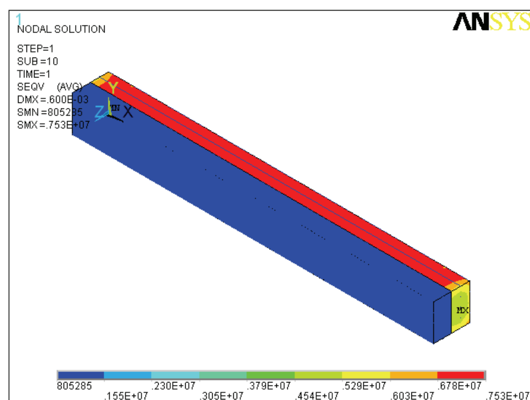


图 6-85　等效应力场等值线图

提示：选择坐标值为（1.5，0.15，0.075）的节点。

4）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data　For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODNUM1，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set　Highest node num，如图 6-86 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

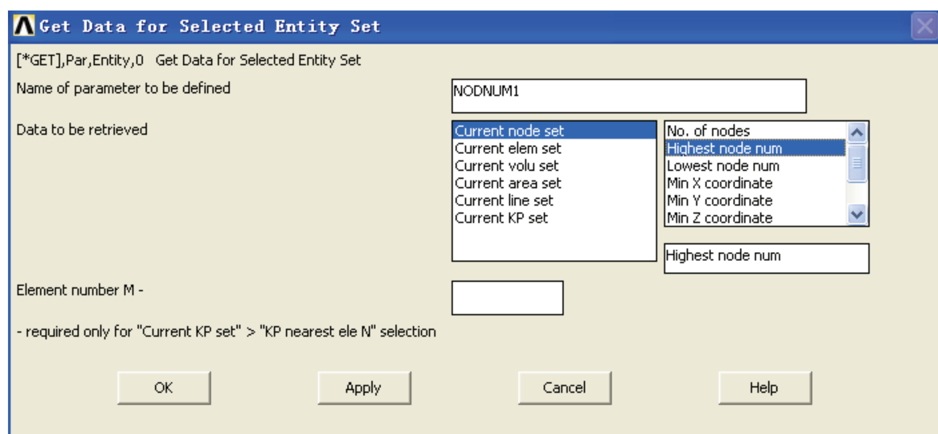


图 6-86　获取节点编号对话框

提示：获取所选节点的编号。

5）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Nodal results，单击 OK 按钮，出现 Get Nodal Results Data 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 STRESS1，在 Node number N 输入栏中输入 NODNUM1，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 Stress→von Mises　SEQV，如图 6-87 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

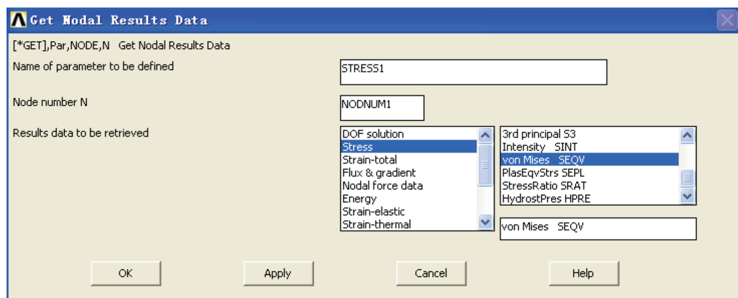


图 6-87　获取节点应力对话框

提示：获取所选节点的等效应力值。

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 1.5，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮；在第 3 栏中选择 Y coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0.15，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 Apply 按钮；在第 3 栏中选择 Z coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0.225，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 下拉选框中选择 Model data　For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODNUM2，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set　Highest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 下拉选框中选择 Results data　Nodal results，单击 OK 按钮，出现 Get Nodal Results Data 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 STRESS2，在 Node number N 输入栏中输入 NODNUM2，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 Stress　von Mises　SEQV，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：以上 3 步操作为选择坐标值为（1.5，0.15，0.225）的节点并获取其编号和等效应力值。

9）选择 Utility Menu | List | Status | Parameters | All Parameters 命令，ANSYS 显示窗口将列表显示 A、B 两基体中心处节点应力值，如图 6-88 所示。

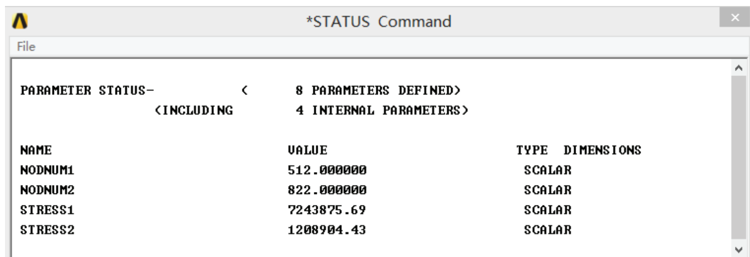


图 6-88　基体中心处节点应力计算结果

10）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

✍ **试一试：将纤维的数量增加 1 倍，分析计算结果的变化。**



6.4.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE3                              ！定义工作文件名
/TITLE，THERMAL EXPANSION OF COMPOSITE BAR        ！定义工作标题
/VIEW，1，1，1，1                                ！设置视图显示方向

/PREP7                                           ！进入前处理器
ET，1，SOLID185                                  ！定义单元类型
ET，2，MPC184
KEYOPT，2，1，1                                  ！设置单元关键字
KEYOPT，2，2，1
MP，EX，1，3.6E10                                ！定义材料参数
MP，PRXY，1，0.3
MP，EX，2，6.0E9
MP，PRXY，2，0.3
MPTEMP，1，0，100
MPDATA，ALPX，3，1，0，2E-6
MPDATA，ALPY，3，1，0，2E-6
MPDATA，ALPZ，3，1，0，2E-6
N，1，0，0，0                                    ！创建节点
N，2，3，0，0
N，3，0，0.075，0
N，4，3，0.075，0
N，5，0，0.15，0
N，6，3，0.15，0
N，7，0，0.225，0
N，8，3，0.225，0
N，9，0，0.3，0
N，10，3，0.3，0
TYPE，2
MAT，3
E，1，2                                          ！创建单元
E，3，4
E，5，6
E，7，8
E，9，10
EGEN，5，20，1，5,,,,,,,,,，0.075                ！复制单元
BLOCK，0，3，0，0.3，0，0.15                     ！创建体
BLOCK，0，3，0，0.3，0.15，0.3
VGLUE，1，2
LSEL，S，LOC，X，0                               ！选择线段
LSEL，A，LOC，X，3
LESIZE，ALL，0.075                               ！设置线段等分数
LSEL，INVE
LESIZE，ALL，0.1
```

```
TYPE，1
MAT，1
VMESH，1                                        ！对体划分网格
ALLSEL
MAT，2
VMESH，3
NUMMRG，NODE                                    ！合并同位置节点
SAVE
FINISH

/SOLU                                           ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                                  ！指定分析类型
NLGEOM，ON                                      ！开启大变形选项
OUTRES，ALL，ALL
AUTOTS，ON                                      ！打开自动时间步长
NSUBST，10，1000，10                            ！设置求解步数
NSEL，S，LOC，X，0                              ！选择节点
D，ALL，ALL                                     ！施加位移约束
ALLSEL
TREF，0                                         ！定义参考温度
TUNIF，100                                      ！定义均匀温度载荷
SOLVE                                           ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                          ！进入后处理器
PLNSOL，U，X                                    ！显示 X 方向位移场
PLNSOL，S，EQV                                  ！显示等效应力场
NSEL，S，LOC，X，1.5
NSEL，R，LOC，Y，0.15
NSEL，R，LOC，Z，0.075
*GET，NODNUM1，NODE，，NUM，MAX                 ！获取节点编号
*GET，STRESS1，NODE，NODNUM1，S，EQV            ！获取节点应力
ALLSEL
NSEL，S，LOC，X，1.5
NSEL，R，LOC，Y，0.15
NSEL，R，LOC，Z，0.225
*GET，NODNUM2，NODE，，NUM，MAX
*GET，STRESS2，NODE，NODNUM2，S，EQV
*STATUS，PARM                                   ！显示参数
FINISH
/EXIT，ALL                                      ！退出 ANSYS
```

6.5 复合材料结构分析实例详解——复合材料梁弯曲分析

6.5.1 问题描述

图 6-89 所示为复合材料梁纵截面示意图，该梁由两种材料组成，总长度为 200mm，宽

度为 12.5mm，高度为 7.5mm，一边简支固定，承受 M_y=6000N · mm 的弯矩作用，求将其升温到 200℃时梁的变形和内部应力分布。

Mat1 材料参数如下。

弹性模量：E_1=200GPa；热膨胀系数：α_1 =3E-6；泊松比：ν_1=0.32；

Mat2 材料参数如下。

弹性模量：E_2=50GPa；热膨胀系数：α_2 =1E-6；泊松比：ν_2=0.26

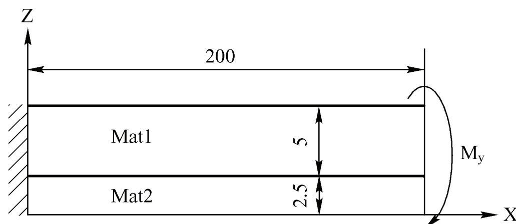


图 6-89　复合材料梁纵截面示意图

6.5.2 问题分析

该问题属于复合材料结构分析问题。选取整体梁建立几何模型，选择 SOLSH190 单元进行分析求解。

6.5.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE4，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 BENDING OF A COMPOSITE BEAM，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 输入栏中依次输入-1、-1、1，在[/VUP]Coord axis orientation 下拉菜单中选择 Z-axis up，如图 6-90 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

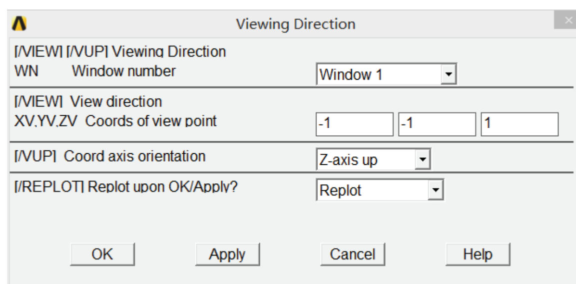


图 6-90　视图显示方向设置对话框

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 的第 1 个列表框中选择 Structural Solid-Shell，在第 2 个列表框中选择 3D finite strain 190，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 6-91 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

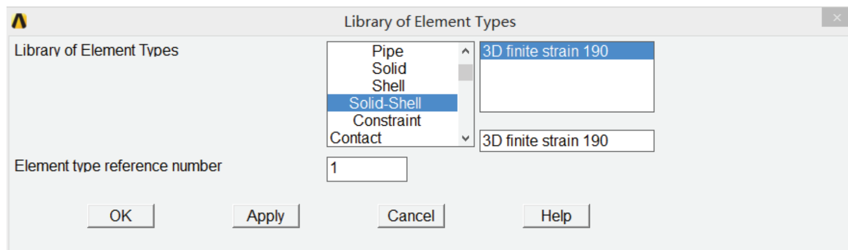


图 6-91　单元类型列表对话框

3）在 Element Types 对话框中单击 Options 按钮，出现 SOLSH190 element type options 对话框，在 Storage of layer data K8 下拉菜单中选择 All layers，如图 6-92 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

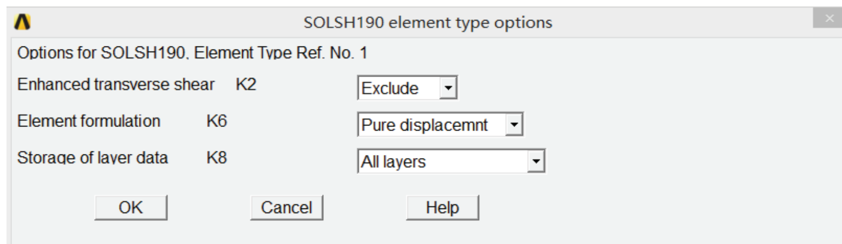


图 6-92　SOLSH190 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框中的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E11，在 PRXY 输入栏中输入 0.32，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 3E-6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）在 Define Material Model Behavior 对话框中单击 Material | New Model 命令，出现 Define Material ID 对话框，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）在 Material Models Defined 对话框中选择 Material Model Number 2，在 Material

Models Available 列表框中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Material Properties for Material Number 2 对话框，在 EX 输入栏中输入 5E10，在 PRXY 输入栏中输入 0.26，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）在 Material Models Available 列表框中依次单击 Structural、Thermal Expansion、Secant Coefficient、Orthotropic 选项，出现 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 2 对话框，在 ALPX 输入栏中输入 1E-6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Sections | Shell | Lay-up | Add/Edit 命令，出现 Create and Modify Shell Sections 对话框，参照图 6-93 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

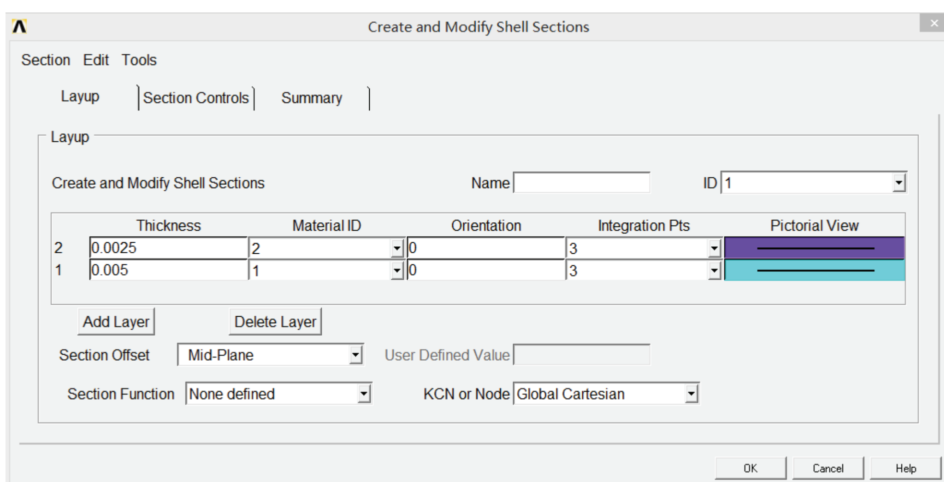


图 6-93　输入单元层信息对话框

提示：可通过单击该对话框中的 Add Layer 按钮增加层数的输入栏。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 NODE　Node number 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示节点编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE　Node number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0、0、0，如图 6-94 所示，单击 Apply 按钮，在 NODE　Node number 输入栏中输入 9，在 X,Y,Z　Location in active CS 输入栏中分别输入 0.2、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

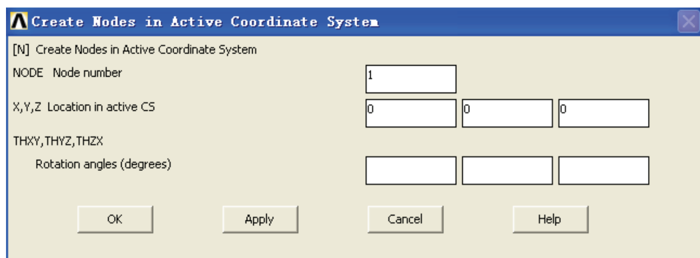


图 6-94　创建节点对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Nodes | Fill between nds 命令，出现 Fill between nds 拾取菜单，在输入栏中输入 1，9，单击 OK 按钮，出现 Create Nodes Between 2 Nodes 对话框，参照图 6-95 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy 命令，出现 Copy Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy nodes 对话框，参照图 6-96 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

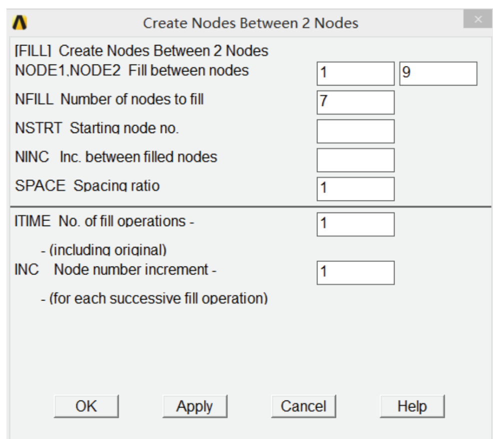


图 6-95　在两节点间创建新节点对话框

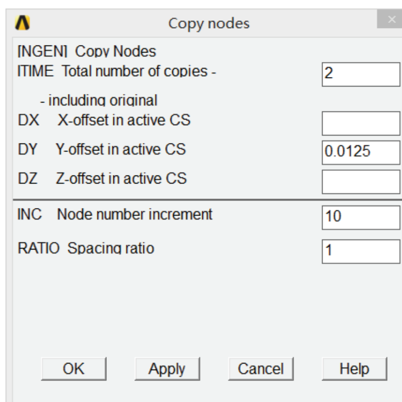


图 6-96　复制节点对话框

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Nodes | Copy 命令，出现 Copy Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy nodes 对话框，在 DZ　Z-offset in active CS 输入栏中输入 0.0075，在 INC　Node number increment 输入栏中输入 20，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Elements | Auto Numbered | Thru Nodes 命令，出现 Elements from Nodes 菜单，在输入栏中输入 1，2，12，11，21，22，32，31，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：通过节点直接生成单元。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Copy | Elements | Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，参照图 6-97 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

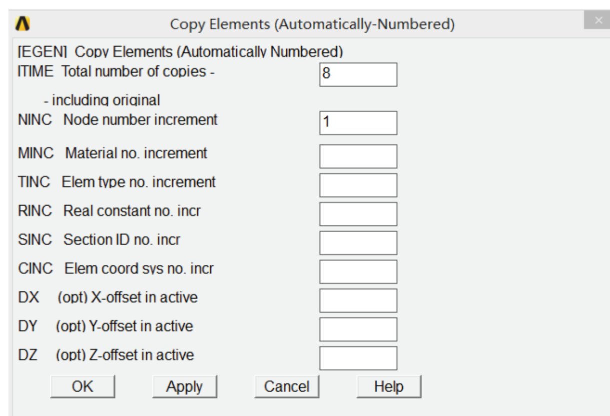


图 6-97　复制单元对话框

8）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将会显示网格划分结果，如图 6-98 所示。

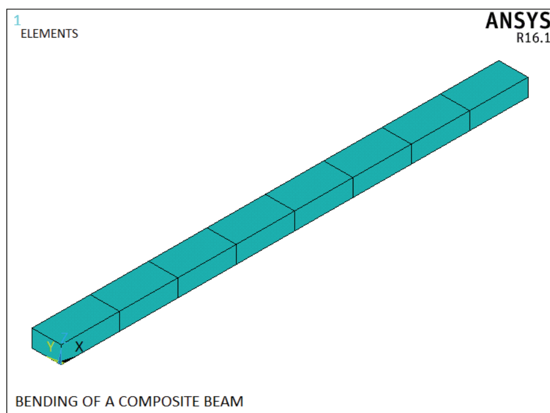


图 6-98　生成的单元结果显示

9）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-1.db，保存上述操作过程。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on N 菜单，在输入栏中输入 1，11，21，31，单击 OK 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 All DOF，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：对所选节点施加位移约束。

3）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Force/Moment | On

Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 菜单，在输入栏中输入 9，19，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉菜单中选择 FX，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入-（3000/7.5），如图 6-99 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

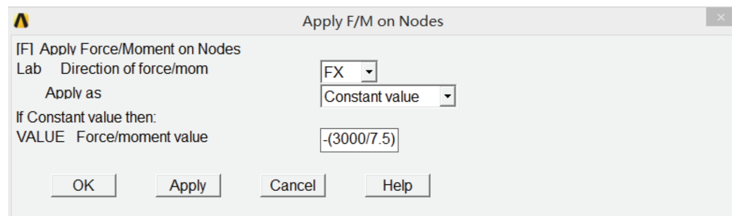


图 6-99 施加力/力偶对话框

4）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Force/Moment｜On Nodes 命令，出现 Apply F/M on Nodes 菜单，在输入栏中输入 29，39，单击 OK 按钮，出现 Apply F/M on Nodes 对话框，在 Lab Direction of force/mom 下拉菜单中选择 FX，在 VALUE Force/moment value 输入栏中输入（3000/7.5），单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Settings｜Reference Temp 命令，出现 Reference Temperature 对话框，在［TREF］ Reference temperature 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Settings｜Uniform Temp 命令，出现 Uniform Temperature 对话框，在［TUNIF］ Uniform temperature 输入栏中输入 200，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令。

8）选择 Main Menu｜Solution｜Solve｜Current LS 命令，单击 Solve Current Load Step 对话框上的 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

9）求解结束后，ANSYS 显示窗口出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE4-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Read Results｜Last Set 命令。

2）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Multi-Window Layout 命令，出现 Multi-Plotting 对话框，在 Window Layout 选项框中选择 Two（Top-Bottom），单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜DOF Solution｜Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示合位移场等值线图，如图 6-100 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution｜Stress｜X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 X 方向应力场等值线图，如图 6-101 所示，单击 OK

按钮关闭该对话框。

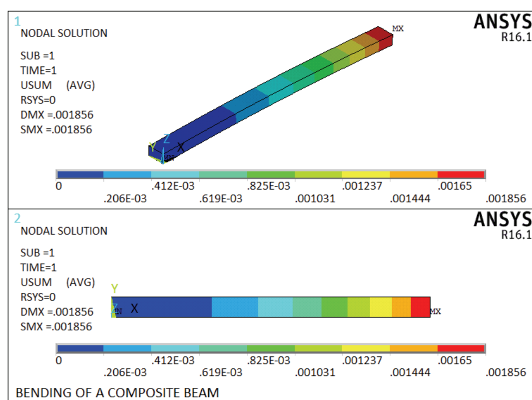


图 6-100　合位移场等值线图

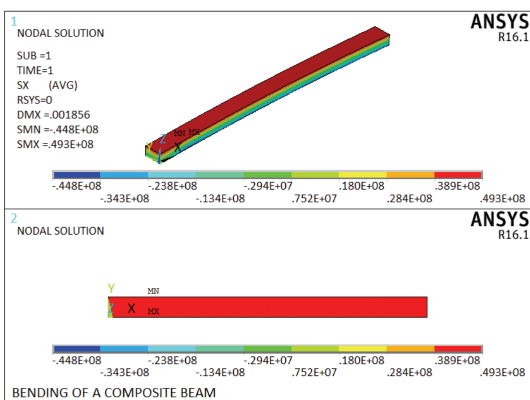
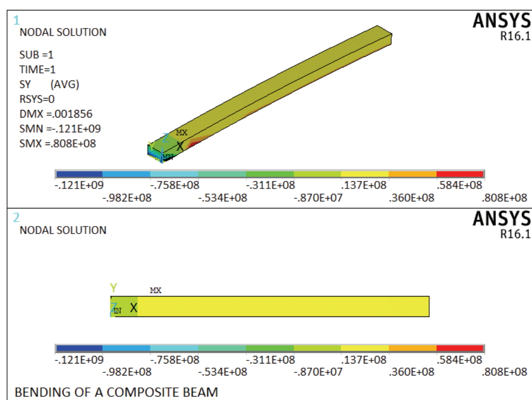


图 6-101　X 方向应力场等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | Y-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Y 方向应力场等值线图，如图 6-102 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | Z-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示 Z 方向应力场等值线图，如图 6-103 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



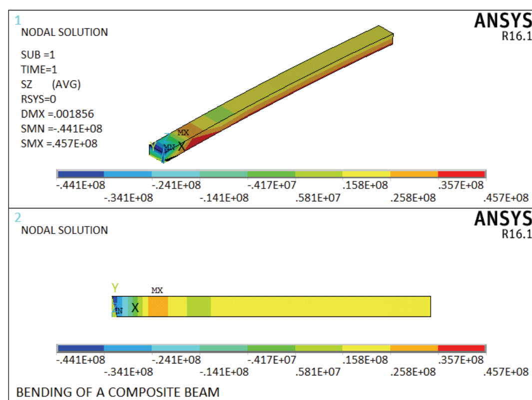


图 6-102　Y 方向应力场等值线图

图 6-103　Z 方向应力场等值线图

7）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | XY Shear stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示剪应力等值线图，如图 6-104 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出



现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口显示等效应力场等值线图，如图 6-105 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

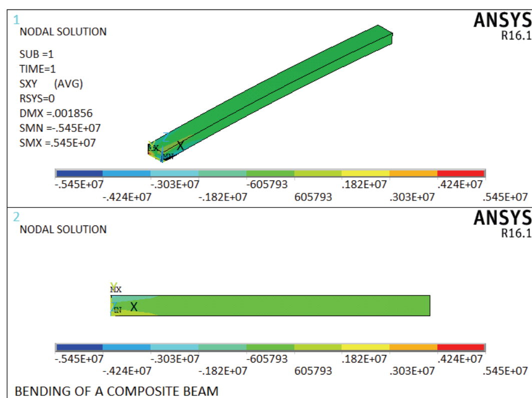


图 6-104　XY 方向剪应力等值线图

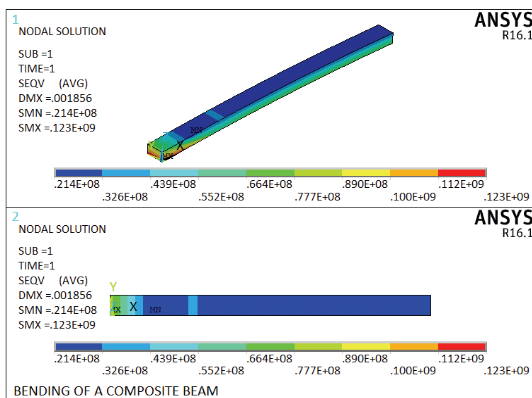
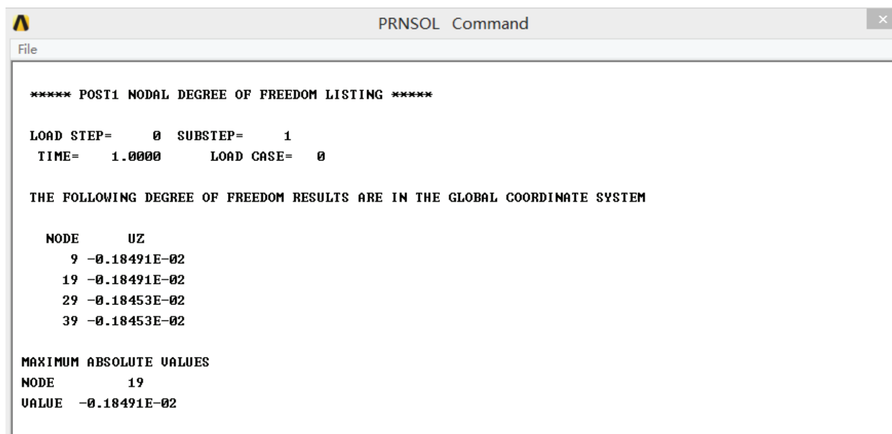


图 6-105　等效应力场等值线图

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0.2，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 X 坐标值为 0.2 的所有节点，即简支梁自由端面上的所有节点。

10）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Z-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 列表显示梁自由端面上的节点垂直位移，如图 6-106 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



PRNSOL Command

File

```
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP=     0  SUBSTEP=     1
 TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

  NODE       UZ
     9 -0.18491E-02
    19 -0.18491E-02
    29 -0.18453E-02
    39 -0.18453E-02

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE          19
VALUE  -0.18491E-02
```

图 6-106　简支梁自由端面节点垂直位移列表显示

11）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinate，

在 Min,Max 输入栏中输入 0.0075，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 Z 坐标值为 0.0075 的所有节点，即简支梁顶面上的所有节点。

12）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 列表显示简支梁顶面上所有节点的应力，如图 6-107 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

PRNSOL Command

File

```
***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP=     0  SUBSTEP=     1
 TIME=    1.0000      LOAD CASE=   0
NODAL RESULTS ARE FOR MATERIAL   1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

  NODE    SX          SY          SZ          SXY         SYZ         SXZ
    21  0.48458E+08-0.88632E+07-0.44086E+08 0.22220E+07 0.91533E-09 0.24324E-04
    22  0.49332E+08 0.24995E+08 0.34026E+08 0.80927E+06 0.30038E-06 0.23657E-04
    23  0.47636E+08 0.15658E+08 0.13258E+08-0.22012E+06-0.21156E-06 0.23656E-04
    24  0.48067E+08 0.18125E+08 0.18761E+08  59600.    -0.81858E-07 0.23903E-04
    25  0.47957E+08 0.17471E+08 0.17303E+08 -16078.     0.18208E-06 0.24531E-04
    26  0.47985E+08 0.17645E+08 0.17689E+08  4323.0     0.88745E-07 0.29780E-04
    27  0.47978E+08 0.17598E+08 0.17587E+08 -1154.4     0.37406E-06 0.31775E-04
    28  0.47980E+08 0.17611E+08 0.17614E+08  288.55    -0.57129E-06 0.20171E-04
    29  0.47979E+08 0.17607E+08 0.17605E+08 -287.10    -0.10359E-05 0.10773E-04
    31  0.48458E+08-0.88632E+07-0.44086E+08-0.22220E+07 0.91533E-09 0.49492E-05
    32  0.49332E+08 0.24995E+08 0.34026E+08-0.80927E+06 0.30038E-06 0.60384E-05
    33  0.47636E+08 0.15658E+08 0.13258E+08 0.22012E+06-0.21156E-06 0.68296E-05
    34  0.48067E+08 0.18125E+08 0.18761E+08 -59600.    -0.87314E-07 0.79425E-05
    35  0.47957E+08 0.17471E+08 0.17303E+08  16078.     0.20244E-06 0.10753E-04
    36  0.47985E+08 0.17645E+08 0.17689E+08 -4323.0     0.88745E-07 0.76332E-05
    37  0.47978E+08 0.17598E+08 0.17587E+08  1154.4     0.37406E-06 0.19599E-05
    38  0.47980E+08 0.17611E+08 0.17614E+08 -288.55    -0.73416E-06 0.12286E-05
    39  0.47979E+08 0.17607E+08 0.17605E+08  287.10    -0.94867E-06 0.16521E-05
```

图 6-107　简支梁顶面节点应力列表显示

13）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 菜单，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Z coordinate，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：选择 Z 坐标值为 0 的所有节点，即简支梁底面上的所有节点。

14）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Nodal Solution 命令，出现 List Nodal Solution 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | X-Component of stress，单击 OK 按钮，ANSYS 列表显示简支梁底面上所有节点的应力，单击 OK 按钮关闭该对话框。

15）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令。

16）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Nodal results，单击 OK 按钮，出现 Get Nodal Results Data 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 U1，在 Node number N 输入栏中输入 9，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 DOF solution

Translation UZ，如图 6-108 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

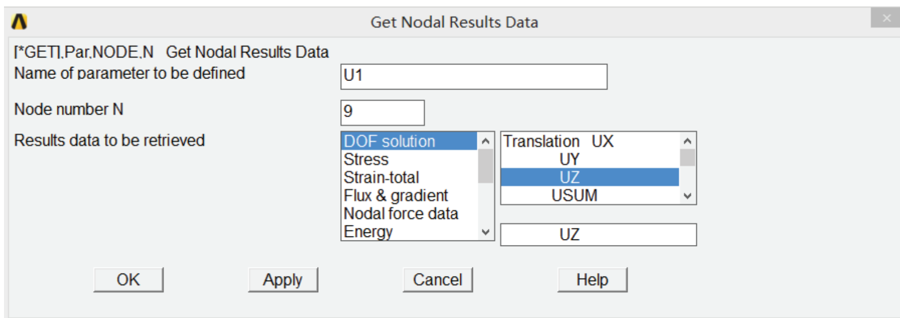


图 6-108　获取节点求解信息对话框

提示：获取节点 9 的 Z 方向位移值。

17）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data　Nodal results，单击 OK 按钮，出现 Get Nodal Results Data 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 ST1，在 Node number N 输入栏中输入 21，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 Stress　X-direction SX，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Utility Menu | List | Status | Parameters | All Parameters 命令，ANSYS 将显示所获取的参量信息，如图 6-109 所示。

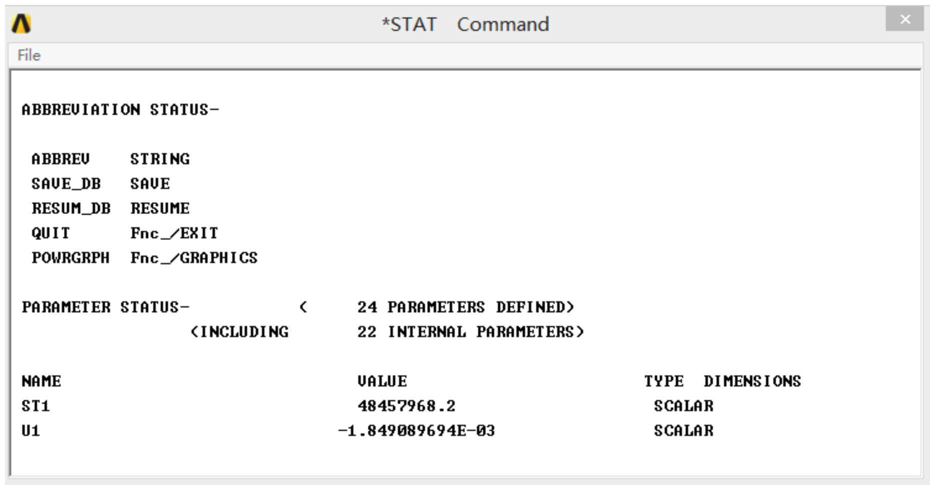


图 6-109　参量信息显示

19）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!，单击 OK 按钮关闭 ANSYS。

试一试：如果简支梁自由端同时承受垂直向下的均布载荷 20MPa（Z 方向受压），试求解此时简支梁内部的应力场。

6.5.4 命令流



```
/FILNAME，EXERCISE4                         ！定义工作文件名
/TITLE， Bending of a Composite Beam        ！定义工作文件名
/VIEW，1，-1，-1，1                          ！设置视图显示方向
/VUP，1，Z

/PREP7                                      ！进入前处理器
ET，1，SOLSH190                             ！定义单元
KEYOPT，1，8，1                             ！设置单元关键字
MP，EX，1，2E11                             ！输入材料性能参数
MP， ALPX，1，3E-6
MP，PRXY，1，0.32
MP，EX，2，5E10
MP，ALPX，2，1E-6
MP，PRXY，2，0.26
SECTYPE， 1， SHELL                         ！输入梁横截面信息
SECDATA，0.005，1
SECDATA， 0.0025，2

N，1                                        ！创建节点
N，9，0.2
FILL，1，9
NGEN，2，10，1，9，1，，0.0125               ！复制节点
NGEN，2，20，1，19，1，，，0.0075
E，1，2，12，11，21，22，32，31              ！创建单元
EGEN，8，1，-1                              ！复制单元
EPLOT
SAVE
FINISH

/SOLU                                       ！进入求解器
ANTYPE，STATIC
D，1，ALL，，，31，10                         ！施加位移约束
F，9，FX，-(3000/7.5)，，19，10              ！施加集中力载荷
F，29，FX，(3000/7.5)，，39，10
TUNIF，200                                  ！施加温度载荷
SOLVE                                       ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                      ！进入 POST1 后处理器
```

```
PLNSOL，U，SUM                              ！显示等效位移场
PLNSOL，S，X                                ！显示 X 方向应力场
PLNSOL，S，Y                                ！显示 Y 方向应力场
PLNSOL，S，Z                                ！显示 Z 方向应力场
PLNSOL，S，XY                               ！显示 XY 剪应力场
PLNSOL，S，EQV                              ！显示等效应力场
NSEL，S，LOC，X，0.2                        ！选择节点
PRNSOL，U，Z                                ！列表显示节点 Z 方向位移
NSEL，S，LOC，Z，0.0075
PRNSOL，S，COMP                             ！列表显示节点应力
NSEL，S，LOC，Z
PRNSOL，S，COMP
*GET，U1，NODE，9，U，Z                     ！获取节点位移求解结果
*GET，ST1，NODE，21，S，X                   ！获取节点应力求解结果
*STATUS，PARM                               ！显示参数
FINISH
/EXIT，  ALL                                ！退出 ANSYS
```

第7章　ANSYS 16.1结构疲劳分析及实例详解



本章导读：

本章主要介绍结构疲劳分析的基本过程和工程应用实例，通过对实例进行具体、详细的分析求解，使读者熟悉疲劳问题分析的基本方法和基本步骤，并为读者提供典型的疲劳问题求解思路。

7.1　结构疲劳分析基本过程

7.1.1 结构疲劳介绍

1．疲劳的定义

疲劳是结构在一定的载荷水平范围内（小于极限静载荷）承受重复性载荷而产生的一种破坏现象。例如，一根能承受 500kN 拉力作用的钢杆，在 350kN 的载荷作用下，经历了 1000000 次循环被破坏。

2．疲劳破坏的主要影响因素

疲劳破坏的主要影响因素如下：

- 经历的循环载荷次数；
- 每一个循环载荷的应力范围；
- 每一个循环载荷的平均应力；
- 局部应力集中现象的存在。

3．ANSYS 疲劳计算的功能

ANSYS 具有以下疲劳计算的能力：

- 根据应力求解结果，计算疲劳参数；
- 可以在一系列预先选定的位置上确定一定数目的应力循环和应力循环载荷，并存储这些位置上的应力；
- 可以在每一个选定位置上定义应力集中系数并为每一个应力循环定义标定参数。

4．疲劳分析基本术语

- Location（位置）

在模型上存储疲劳应力的点，也是结构上可能产生疲劳破坏的位置。

- Event（事件）

在特定的应力循环下，在不同事件内一系列的应力情况。

- Loading（载荷）

载荷是一个事件的部分，是应力条件之一。交变应力强度是两个载荷之间应力状态之差的度量。

7.1.2 疲劳分析步骤

疲劳计算通常是在完成结构静力分析之后进行，进行结构静力分析的步骤与第 3 章的结构线性静力分析相同。下面主要介绍在 POST1 通用后处理器中进行疲劳计算的 5 个主要步骤。

1．进入 POST1，恢复数据库

Command：POST1

GUI：Main Menu | General Postproc

Command：RESUME

GUI：Utility Menu | File | Resume From

2．建立疲劳计算规模，定义材料疲劳参数，设置疲劳计算参数

（1）定义疲劳计算规模

进行疲劳计算的节点位置可以大于 5 个，事件可取 10 个，每一个事件可取 3 种载荷，如果需要可以选择较大的规模。

Command：FTSIZE

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Size Settings

（2）定义材料疲劳参数

和疲劳计算相关的材料性质如下：

- S-N 曲线

描述交变应力强度（Smax-Smin）/2 和疲劳循环次数关系的曲线。如果需要，可以把输入的 S-N 曲线进行调节，即将平均应力强度按从大到小的次序进行排列，并且考虑各种应力组合的情况。

Command：FP

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | S-N Table

- S_m-T 曲线

描述设计应力强度和温度的曲线。如果要考虑名义应力范围是否进入塑性，必须计及该曲线。

Command：FP

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | S_m-T Table

- 弹塑性材料应变硬化指数 M 和 N

Command：FP

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | Elas-plas Par

（3）设置疲劳计算系数

Command：FL

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Stress Locations

注意：并不是所有的疲劳分析都使用 FL 命令。如果使用 FS、FSNODE 或 FSSECT 命令，则疲劳分析的节点位置可以自动定义；假使在建模时包含足够细的网格，则所计算的应力是精确的，因此不需定义应力集中系数（但若要考虑表面效应、尺寸效应及腐蚀效应，还需定义应力集中系数）

3．存储应力，列表显示、绘图显示或删除存储的应力，指定事件循环次数和比例因子，获得正确的使用参数

（1）存储应力

● 人工存储应力

Command：FS

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Specified Val

● 从 Jobname.RST 文件中读取应力

Command：FSNODE

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File

● 横截面应力

Command：FSSECT

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | At Cross Sect

（2）列表显示、绘图显示或删除存储的应力

● 列表显示每一个位置、每一个事件、每一个载荷或每一个应力条件下的存储应力

Command：FSLIST

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | List Stresses

● 以载荷数目函数的形式显示某一特殊位置和事件的应力

Command：FSPLOT

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Plot Stresses

● 删除存储在某一特殊位置、事件和载荷作用下的应力

Command：FSDELE

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Dele Stresses

● 删除某一特殊位置的所有应力

Command：FL

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Stress Locations

● 删除某一特殊事件中各种载荷的所有应力

Command：FE

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Erase Event Data

（3）指定事件循环次数和比例因子

Command：FE

GUI：Main Menu | General Postproc | Fatigue | Assign Event

（4）获得正确的使用参数

结构往往承受各种最大和最小的应力，它通常是随机的，因此就必须谨慎考虑如何在各种可能的范围内得到正确的重复循环次数，从而获得正确的使用系数。

ANSYS 采用众所周知的“雨流”法自动计算所有可能的应力范围，并跟踪这些应力发生的

次数，在选定的节点位置对产生最重要的应力强度范围的所有事件进行搜索，并记录在这些应力范围内产生的循环次数，包含这些载荷的事件的循环次数因此不断减少。至少这些事件之一的某一位置充分地受到最大和最小应力的作用，而被保存下来的属于这一事件的其他应力情况随后被忽略。这一过程一直进行到所有的应力范围及循环次数都被计及后结束。

在设计事件时应考虑下列思路：

- 理解 ANSYS 内部逻辑计数范围算法，可参阅 ANSYS Release16.1 Documentation。
- 由于在 3D 应力状态下很难预测哪一个载荷步具有最大或最小的应力，可以对每一个事件用几个相似的载荷作用，以便成功获得最大或最小应力。
- 如果在某一给定事件中，只包含一个最大或最小应力，则将获得一个较为保守的结果；如果在一个事件中，引入不止一个最大或最小应力，则有可能产生不保守的结果。

4．激活疲劳计算

Command：FTCALC

GUI：Main Menu｜General Postproc｜Fatigue｜Calculate Fatig

5．查看计算结果

疲劳计算结果被记录在输出事件上，可采用列表形式对疲劳计算结果进行检查。

Command：*LIST

GUI：Utility Menu｜List｜Files｜Other｜Jobname.OUT

7.2 结构疲劳分析实例详解——带孔板状构件疲劳分析

7.2.1 问题描述

图 7-1 所示为一板状构件结构示意图，在其两端承受大小为 20MPa 的拉压交变载荷，试对其进行疲劳分析。

材料参数：

弹性模量 E=200GPa；泊松比ν=0.3；疲劳特性参数见表 7.1。

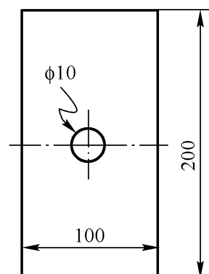


图 7-1 板状构件结构示意图

表 7.1 疲劳循环次数和交变应力强度对应关系表

N	1×10^2	2×10^2	5×10^2	1×10^3	1.5×10^3	2×10^3
S	150	120	110	100	95	90
N	1×10^4	1×10^5	1×10^6	2×10^6	3×10^3	5×10^6
S	85	80	75	70	65	60
N	6×10^6	7×10^6	8×10^6	9×10^6	1×10^7	1.2×10^7
S	55	50	45	40	35	30

7.2.2 问题分析

根据对称性，取整体模型的 1/4 建立几何模型，采用 PLANE182 单元进行分析求解。

将拉伸和压缩载荷分为两个载荷步进行计算，再将计算结果读入到后处理器中采用疲劳分析命令进行疲劳分析。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE42 结构单元。

7.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 FATIGUE ANALYSIS OF A PLATE WITH CIRCULAR HOLE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Solid，Quad 4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 7-2 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

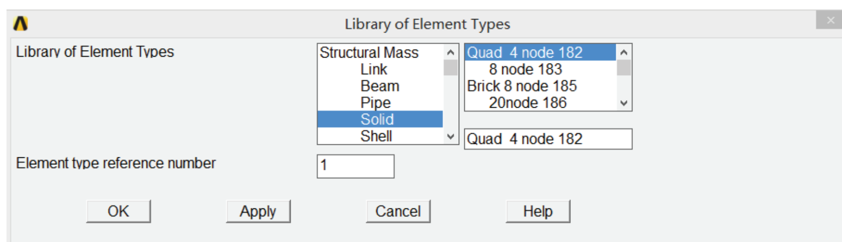


图 7-2 单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE182 element type options 对话框，在 Element technology K1 选项框中选择 Enhanced Strain，如图 7-3 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

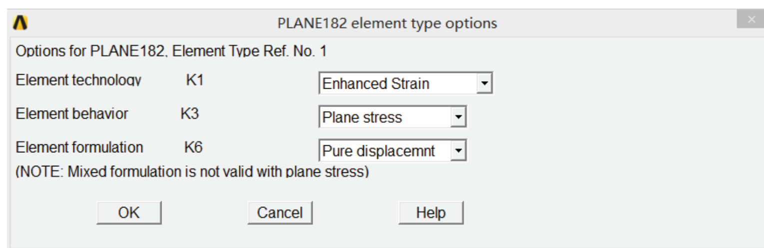


图 7-3 PLANE182 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Material Props | Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框上选择 Material | Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 KP　Keypoint numbers、LINE　Line numbers 和 AREA　Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，如图 7-4 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：显示关键点、线段及面编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入 0、50，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、100，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle 命令，出现 Solid Circular Area 对话框，在 WP X 和 WP Y 输入栏中都输入 0，在 Radius 输入栏中输入 5，如图 7-5 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

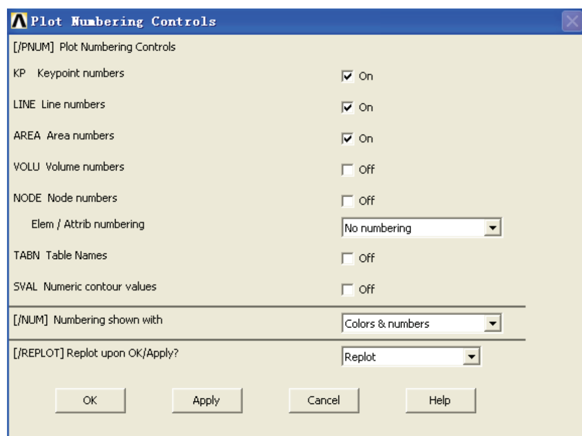


图 7-4　编号显示控制对话框

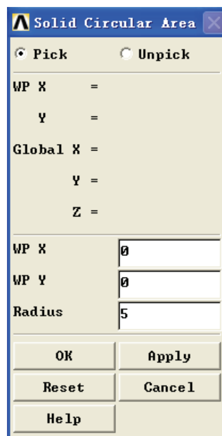


图 7-5　创建圆面对话框

注意：长度单位选择 mm。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas 命令，出现 Subtract Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单，图 7-6 是面相减后的结果。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现

Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩实体编号。

6）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 10，如图 7-7 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

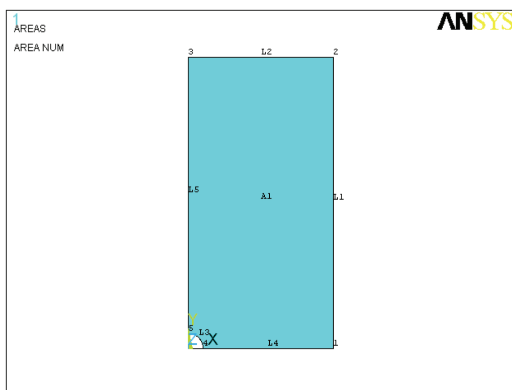


图 7-6 面相减后的结果显示

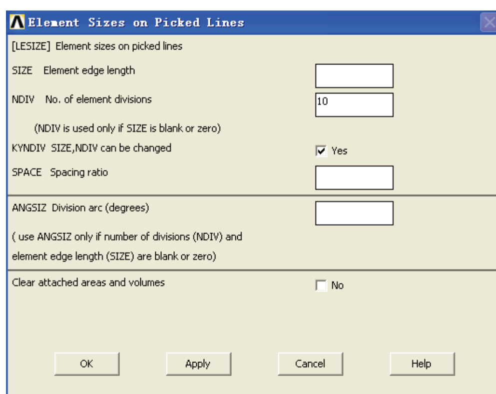


图 7-7 设置线段等分数对话框

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 6，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 16，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 4，5，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 12，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.05，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：将线段 4、5 设置为 12 段，且长度依次减小，最后 1 段的长度为第 1 段长度的 0.05 倍。

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Mapped | By Corners 命令，出现 Map Mesh Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 3，5，4，1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

注意：进行映射网格划分，关键点的选择需按照上述的次序，否则将导致网格划分过程无法正常进行或出现错误的结果。

12）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 7-8 所示。

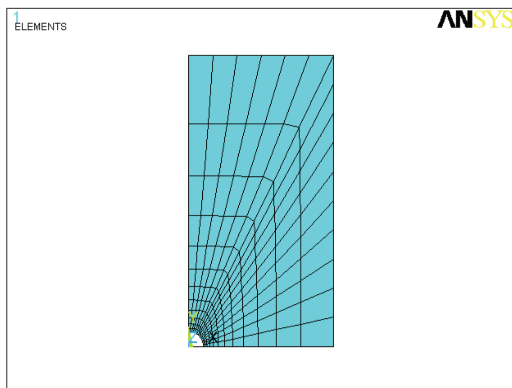


图 7-8 网格划分结果显示

13）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，如图 7-9a 所示，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该菜单。

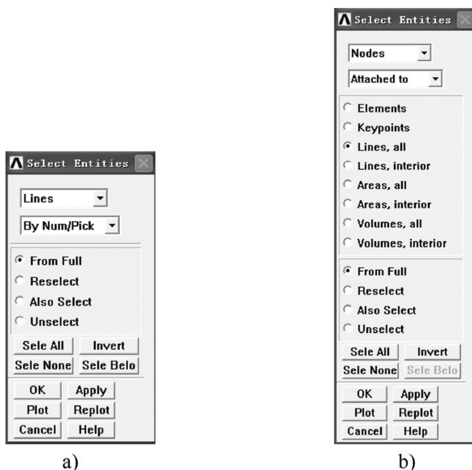


图 7-9 选择实体对话框

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines，all，在第 4 栏中选择 From Full，如图 7-9b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择编号为 5 的线段上的所有节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 X-axis，如图 7-10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

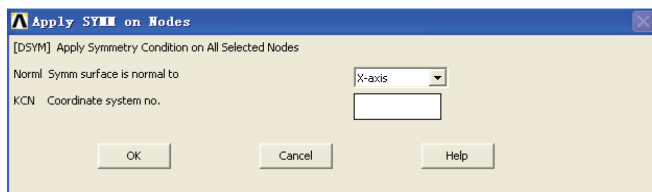


图 7-10 施加对称位移约束对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

7）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉菜单中选择 Y-axis，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在［SF］ Apply PRES on nodes as a 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 20，如图 7-11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

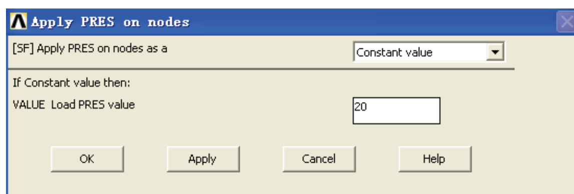


图 7-11 施加压力载荷对话框

12）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

14）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．进入后处理，查看结构分析结果并进行疲劳分析设置

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-12 所示的 Y 方向位移等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-13 所示的合位移等值线图。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-14 所示的等效应力等值线图。

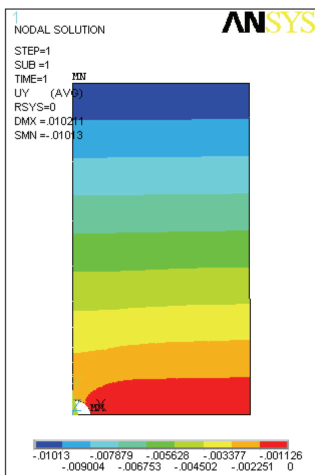


图 7-12 Y 方向位移等值线图

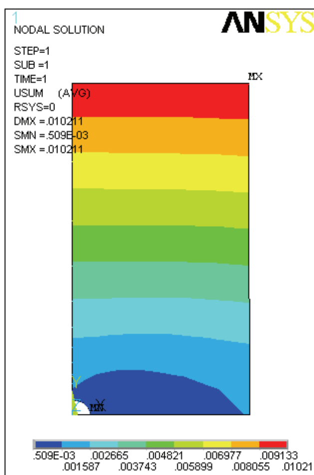


图 7-13 合位移等值线图

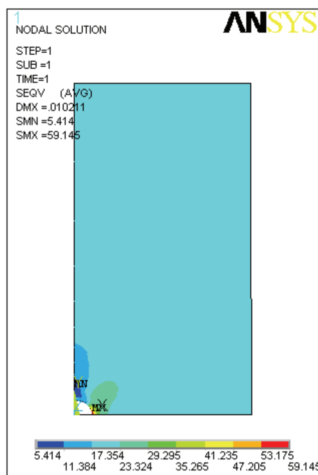


图 7-14 等效应力等值线图

技巧：以上 3 图均采用 1/2 屏幕显示，用户可通过执行 Utility Menu | PlotCtrls | Multi-Window Layout 命令实现该功能。

4）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示支反力结果，如图 7-15 所示。

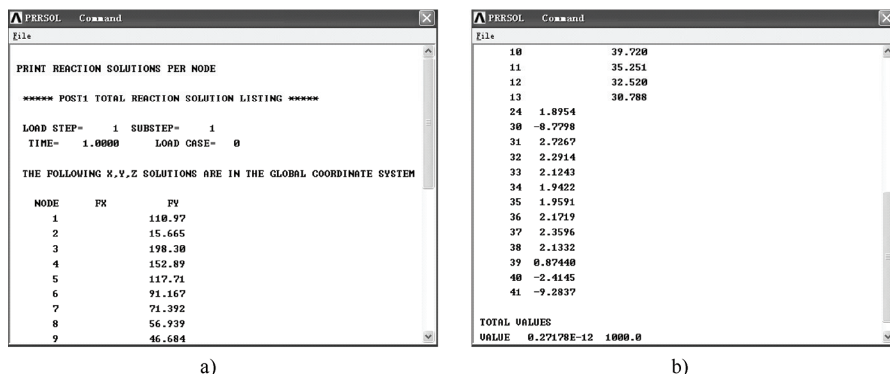


图 7-15 支反力结果显示

5）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Size Settings 命令，出现 Fatigue Size Settings 对话框，在 MXLOC Max. no. of fatigue loc's 输入栏中输入 1，在 MXEV Max. no. of fatig events 输入栏中输入 1，在 MXLOD Max. no. of loadings 输入栏中输入 2，如图 7-16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

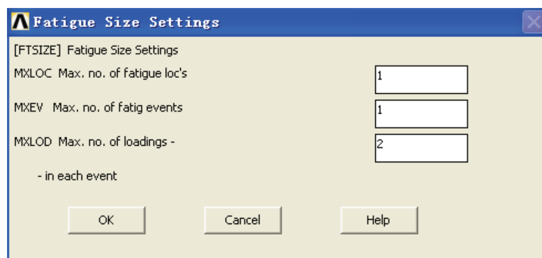


图 7-16 疲劳数据存储步长设置对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 5，在第 5 栏中选择 From Full，如图 7-17a 所示，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，如图 7-17b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

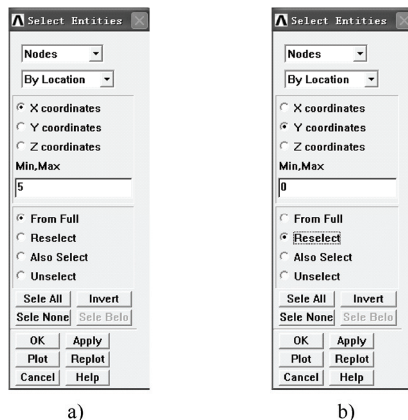


图 7-17 根据坐标值选择节点

提示：选择 X 坐标值为 5、Y 坐标值为 0 的节点。

7）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，如图 7-18 所示，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NC1，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，如图 7-19 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

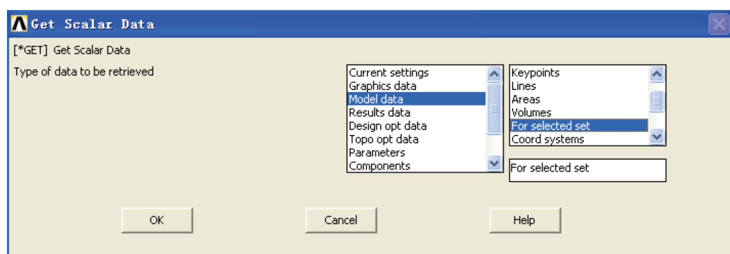


图 7-18　获取参量信息对话框

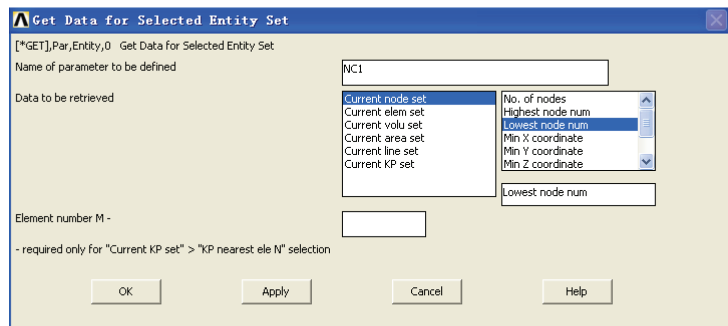


图 7-19　获取已选参量信息对话框

技巧：获取 X 坐标值为 5、Y 坐标值为 0 的节点编号并将其存储到变量 NC1 中。第 6）、7）步的操作过程可用 NC1=NODE（5，0，0）命令代替。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File 命令，出现 Store Stresses at a Node，From Results File 对话框，在 NODE　Node no. for strs storage 输入栏中输入 NC1，在 NEV　Event number 输入栏中输入 1，在 NLOD　Loading number 输入栏中输入 1，如图 7-20 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

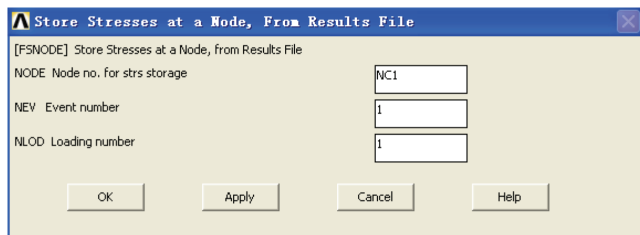


图 7-20　从结果文件中获取并存储节点应力对话框

9）选择 Main Menu｜General Postproc｜Fatigue｜Store Stresses｜List Stresses 命令，出现 List Stored Stresses 对话框，参照图 7-21 所示对其进行设置，单击 OK 按钮，ANSYS 将列表显示已存储的节点应力，如图 7-22 所示。

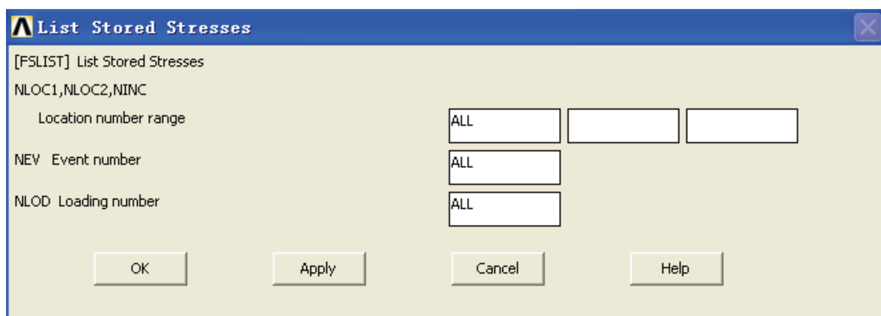


图 7-21　列表显示已存储的节点应力对话框

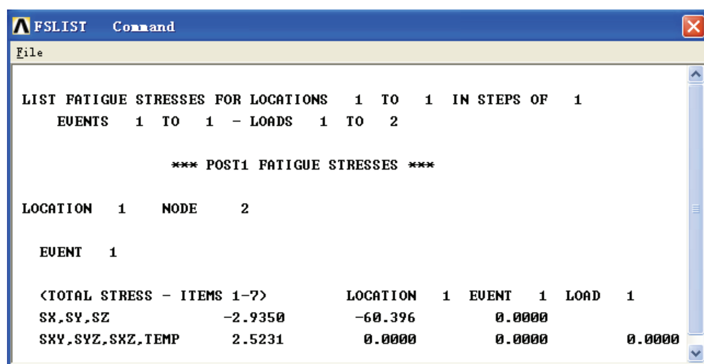


图 7-22　已存储的节点应力结果显示

7．进入求解器，二次加载求解

1）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

2）选择 Utility Menu｜Select｜Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）选择 Main Menu｜Solution｜Define Loads｜Apply｜Structural｜Pressure｜On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在［SF］ Apply PRES on nodes as a 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入-20，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：输入负值表示施加拉应力载荷。

4）选择 Utility Menu｜Select｜Everything 命令，选择所有实体。

5）选择 Main Menu｜Solution｜Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对



话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

6）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-3.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8．进入后处理，进行疲劳分析并查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-23 所示的 Y 方向位移等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-24 所示的合位移等值线图。

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 7-25 所示的等效应力等值线图。

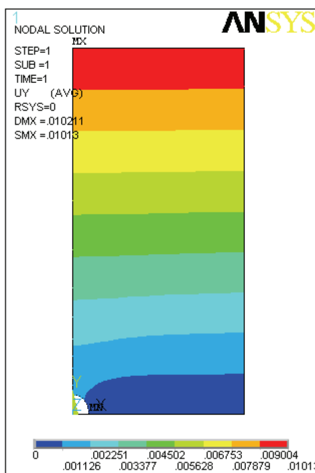


图 7-23　Y 方向位移等值线图

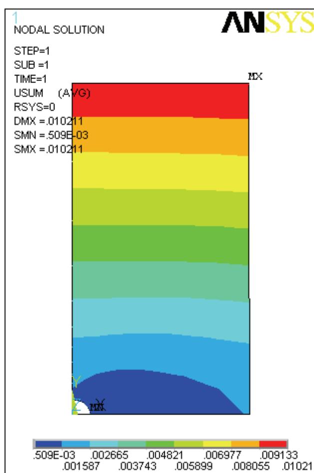


图 7-24　合位移等值线图

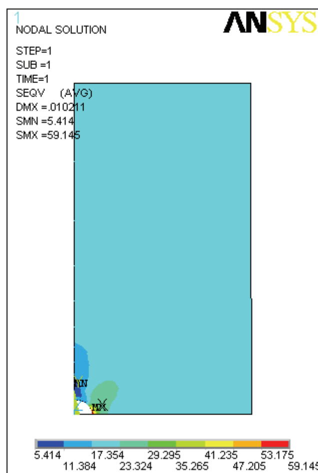
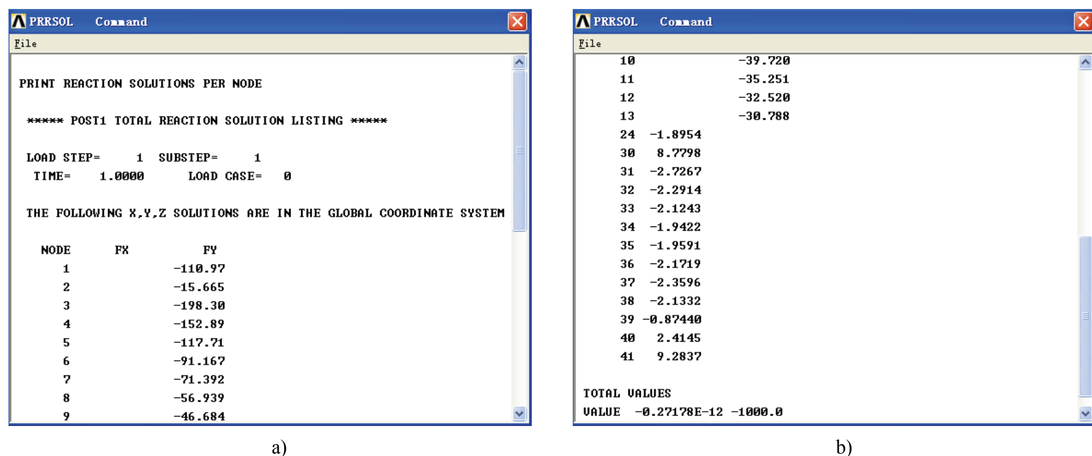


图 7-25　等效应力等值线图

提示：输出位移单位为 mm，应力单位为 MPa。

4）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab　Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示支反力结果，如图 7-26 所示。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | From rst File 命令，出现 Store Stresses at a Node，From Results File 对话框，在 NODE　Node no. for strs storage 输入栏中输入 NC1，在 NEV　Event number 输入栏中输入 1，在 NLOD　Loading number 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a) b)

图 7-26 支反力结果显示

6）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | List Stresses 命令，出现 List Stored Stresses 对话框，在 Location number range 后面的第 1 个输入栏中输入 ALL，在 NEV Event number 输入栏中输入 ALL，在 NLOD Loading number 输入栏中输入 ALL，单击 OK 按钮，ANSYS 将列表显示已存储的节点应力，如图 7-27 所示。

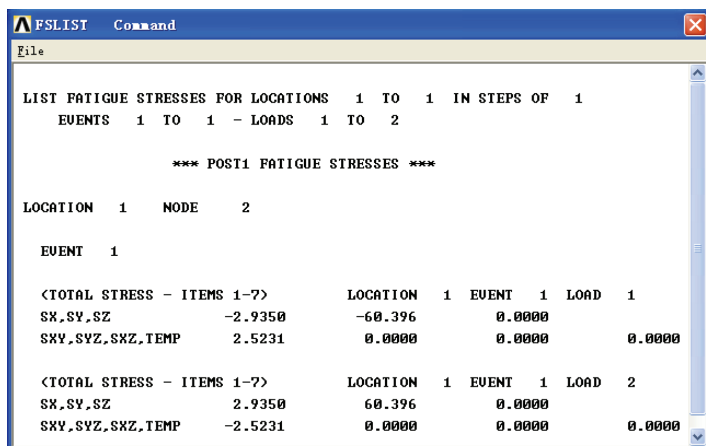


图 7-27 已存储节点应力结果显示

7）选择 Utility Menu | PlotCtrls | Style | Colors | Graph Colors 命令，出现 Graph Colors 对话框，在 CURVE Graph curve number 1 下拉菜单中选择红色，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Store Stresses | Plot Stresses 命令，出现 Plot Stored Stresses 对话框，在 NLOC Location number 输入栏中输入 1，在 NEV Event number 输入栏中输入 1，在 ITEM Item to be plotted 选项中选择 Total stresses，Direct SX，如图 7-28 所示，单击 OK 按钮，ANSYS 显示窗口将显示描述疲劳位置和疲劳事件的应力曲线，如图 7-29 所示。

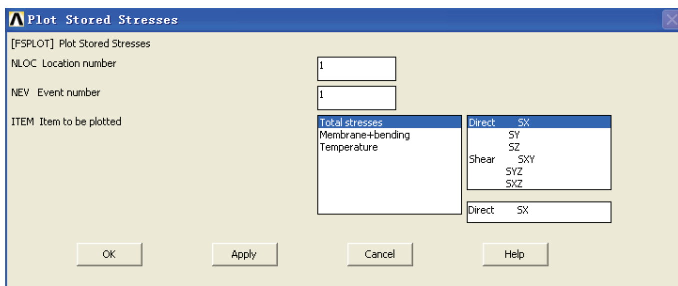


图 7-28　图形显示已存储的疲劳应力对话框

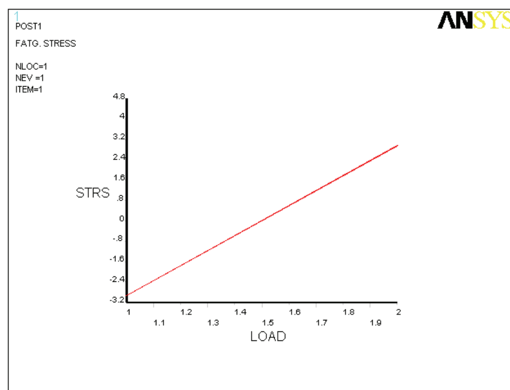
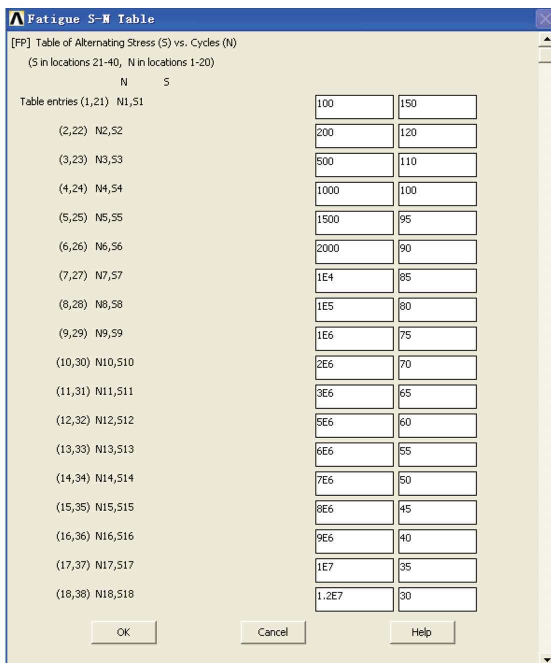


图 7-29　图形显示已存储的疲劳应力曲线

9）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | S-N Table 命令，出现 Fatigue S-N Table 对话框，参照图 7-30 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。


Fatigue S-N Table

[FP] Table of Alternating Stress (S) vs. Cycles (N)

(S in locations 21-40, N in locations 1-20)

	N	S
Table entries (1,21) N1,S1	100	150
(2,22) N2,S2	200	120
(3,23) N3,S3	500	110
(4,24) N4,S4	1000	100
(5,25) N5,S5	1500	95
(6,26) N6,S6	2000	90
(7,27) N7,S7	1E4	85
(8,28) N8,S8	1E5	80
(9,29) N9,S9	1E6	75
(10,30) N10,S10	2E6	70
(11,31) N11,S11	3E6	65
(12,32) N12,S12	5E6	60
(13,33) N13,S13	6E6	55
(14,34) N14,S14	7E6	50
(15,35) N15,S15	8E6	45
(16,36) N16,S16	9E6	40
(17,37) N17,S17	1E7	35
(18,38) N18,S18	1.2E7	30

OK　Cancel　Help

图 7-30　输入 S-N 值对话框

10）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Property Table | List Tables 命令，ANSYS 程序将列表显示疲劳特性参数，如图 7-31 所示。

FPLIST

File

```
LIST FATIGUE PROPERTIES

     N 1 ( 1)       N 2 ( 2)       N 3 ( 3)       N 4 ( 4)       N 5 ( 5)
   100.00         200.00         500.00         1000.0         1500.0
     N 6 ( 6)       N 7 ( 7)       N 8 ( 8)       N 9 ( 9)       N10 (10)
   2000.0         10000.        0.10000E+06    0.10000E+07    0.20000E+07
     N11 (11)       N12 (12)       N13 (13)       N14 (14)       N15 (15)
  0.30000E+07    0.50000E+07    0.60000E+07    0.70000E+07    0.80000E+07
     N16 (16)       N17 (17)       N18 (18)       N19 (19)       N20 (20)
  0.90000E+07    0.10000E+08    0.12000E+08
     S 1 (21)       S 2 (22)       S 3 (23)       S 4 (24)       S 5 (25)
   150.00         120.00         110.00         100.00         95.000
     S 6 (26)       S 7 (27)       S 8 (28)       S 9 (29)       S10 (30)
   90.000         85.000         80.000         75.000         70.000
     S11 (31)       S12 (32)       S13 (33)       S14 (34)       S15 (35)
   65.000         60.000         55.000         50.000         45.000
     S16 (36)       S17 (37)       S18 (38)       S19 (39)       S20 (40)
   40.000         35.000         30.000
```

图 7-31　疲劳特性参数列表显示

11）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Stress Locations 命令，出现 Fatigue Stress Locations 对话框，在 NLOC　Reference no. for location 输入栏中输入 1，在 NODE　Node no. corresp to NLOC 输入栏中输入 NC1，在 Stress conc factors 的 3 个输入栏中分别输入 1、1.5、1，在 Title　Title for this location 输入栏中输入 LOC1，如图 7-32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

Fatigue Stress Locations

[FL] Fatigue Stress Locations

NLOC Reference no. for location　1

NODE Node no. corresp to NLOC　NC1

SCFX,SCFY,SCFZ

Stress conc factors -　1　1.5　1

- in global X,Y,Z directions, applied to total stresses

Title Title for this location　LOC1

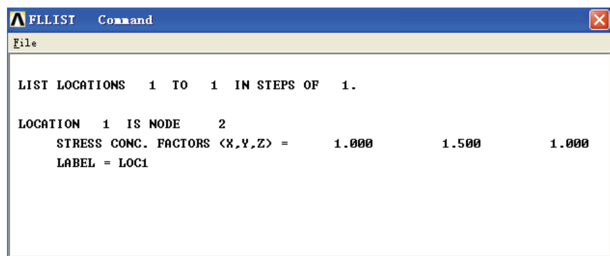
(up to 20 characters)

OK　Apply　Cancel　Help

图 7-32　疲劳位置设置对话框

12）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | List Stress Loc 命令，出现 List Stress Locations 对话框，在 NLOC1　Starting location no.输入栏中输入 ALL，单击 OK 按钮，ANSYS 程序将列表显示疲劳位置，如图 7-33 所示。

13）选择 Main Menu | General Postproc | Fatigue | Assign Events 命令，出现 Assign Event Data 对话框，在 NEV　Ref. no. for this event 输入栏中输入 1，在 CYCLE　Number of cycles 输入栏中输入 10000，在 FACT　Scale factor for stresses 输入栏中输入 1，在 Title Title for this event 输入栏中输入 EVE1，如图 7-34 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。


```
LIST LOCATIONS   1  TO   1  IN STEPS OF   1.

LOCATION   1  IS NODE     2
     STRESS CONC. FACTORS (X,Y,Z) =      1.000        1.500        1.000
     LABEL = LOC1
```

图 7-33　疲劳应力位置列表显示

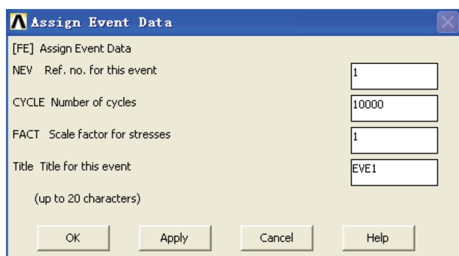
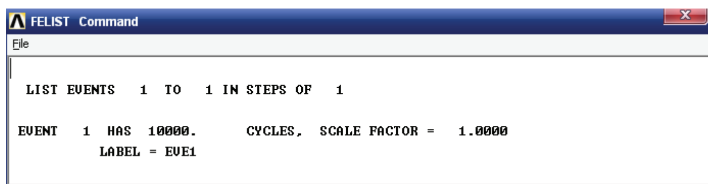


图 7-34　疲劳事件参数设置对话框

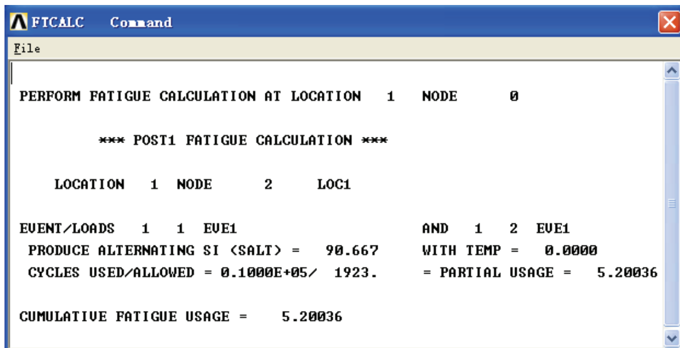
14）选择 Main Menu｜General Postproc｜Fatigue｜List Event Data 命令，出现 List Event Data 对话框，在 Event number range 输入栏中输入 ALL，单击 OK 按钮，ANSYS 程序将显示疲劳事件信息，如图 7-35 所示。


```
 LIST EVENTS   1  TO   1 IN STEPS OF   1

EVENT   1  HAS  10000.      CYCLES,  SCALE FACTOR =   1.0000
          LABEL = EVE1
```

图 7-35　疲劳事件信息列表显示

15）选择 Main Menu｜General Postproc｜Fatigue｜Calculate Fatig 命令，出现 Calculate Fatigue 对话框，在［FTCALC］ Calculate fatigue at 选项中选择 Location number，在 Specified location or node no.输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示疲劳计算结果，如图 7-36 所示。


```
PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION    1    NODE      0

         *** POST1 FATIGUE CALCULATION ***

    LOCATION   1   NODE      2      LOC1

EVENT/LOADS    1    1   EVE1                    AND    1    2   EVE1
 PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) =     90.667     WITH TEMP =    0.0000
 CYCLES USED/ALLOWED = 0.1000E+05/  1923.       = PARTIAL USAGE =    5.20036

CUMULATIVE FATIGUE USAGE =      5.20036
```

图 7-36　疲劳计算结果显示

提示：输出了允许的疲劳循环次数和疲劳使用系数。

16）选择 Utility Menu｜File｜Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit—No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：将小孔尺寸调整为φ30，数量调整为 2 个，对称分布于薄板中心线上，其余条件不变，试对其进行疲劳分析。

7.2.4 命令流



```
/FILNAME，EXERCISE1                         ！定义工作文件名
/TITLE，FATIGUE ANALYSIS OF A PLATE WITH CIRCULAR HOLE
                                            ！定义工作标题
/PREP7                                      ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                             ！指定单元类型
KEYOPT，1，1，3                             ！定义单元关键字
MP，EX，1，2E5                              ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                            ！输入泊松比

/PNUM，KP，1                                ！显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                              ！显示线段编号
/PNUM，AREA，1                              ！显示面编号
RECTNG，0，50，0，100                       ！生成矩形面
CYL4，0，0，5                               ！生成圆面
ASBA，1，2                                  ！面相减操作
NUMCMP，ALL                                 ！压缩实体编号
LPLOT                                       ！显示线段
LESIZE，1，，，10                           ！设置线段等分数
LESIZE，2，，，6
LESIZE，4，，，12，0.05                     ！设置线段单元数量和划分间距系数
LESIZE，5，，，12，0.05
LESIZE，3，，，16
AMAP，1，3，5，4，1                         ！对面进行映射网格划分
EPLOT                                       ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                       ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                              ！指定分析类型
LPLOT                                       ！显示线段
LSEL，S，，，4                              ！选择线段
NSLL，S，1                                  ！选择线段上所有节点
DSYM，SYMM，Y                               ！施加对称位移约束
LSEL，S，，，5
NSLL，S，1
DSYM，SYMM，X
LSEL，S，，，2
NSLL，S，1
SF，ALL，PRES，20                           ！施加压力载荷
ALLSEL                                      ！选择所有实体
SOLVE                                       ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                      ！进入 POST1 后处理器
PLNSOL，U，Y                                ！绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，SUM                              ！绘制合位移场等值线图
```

```
PLNSOL，S，EQV                          ！绘制等效应力场等值线图
PRRSOL                                  ！列表显示支反力求解结果
FTSIZE，1，1，2                         ！疲劳分析参数设置
NSEL，S，LOC，X，5                      ！选择节点
NSEL，R，LOC，Y，0                      ！二次选择节点
*GET，NC1，NODE，，NUM，MIN             ！获取节点编号
FSNODE，NC1，1，1                       ！计算并存储节点应力
FSLIST                                  ！列表显示已存储节点应力
SAVE
FINISH

/SOLU                                   ！二次进入求解器
LSEL，S，，，2                          ！选择线段
NSLL，S，1
SF，ALL，PRES，-20                      ！施加拉应力载荷
ALLSEL                                  ！选择所有实体
SOLVE                                   ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                  ！进入 POST1 后处理器
PLNSOL，U，Y                            ！绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，SUM                          ！绘制合位移场等值线图
PLNSOL，S，EQV                          ！绘制等效应力等值线图
PRRSOL                                  ！列表显示支反力求解结果

FSNODE，NC1，1，2                       ！计算并存储节点应力
FSLIST，ALL，，，ALL，ALL
/COLOR，CURVE，RED，1                   ！设置曲线显示颜色
/REPLOT
FSPLOT，1，1，1                         ！图形显示已存储的疲劳应力
FP，1，100，200，500，1000，1500，2000  ！输入材料疲劳特性参数
FP，7，1E4，1E5，1E6，2E6，3E6，5E6
FP，13，6E6，7E6，8E6，9E6，1E7，1.2E7
FP，21，150，120，110，100，95，90
FP，27，85，80，75，70，65，60
FP，33，55，50，45，40，35，30
FPLIST                                  ！列表显示疲劳性能参数
FL，1，NC1，1，1.5，1，LOC1             ！定义疲劳位置参数
FLLIST                                  ！列表显示疲劳位置参数
FE，1，10000，1，EVE1                   ！定义疲劳事件参数
FELIST                                  ！列表显示疲劳事件参数
FTCALC，1                               ！进行疲劳分析计算
SAVE
FINISH
/EXIT，ALL                              ！退出 ANSYS
```

第 8 章　ANSYS 16.1 结构断裂分析及实例详解

本章导读：

本章主要介绍结构断裂分析的基本过程和工程应用实例，通过对实例进行具体、详细的分析求解，使读者熟悉断裂问题分析的基本方法和基本步骤，并为读者提供典型的断裂问题的求解思路。

8.1　结构断裂分析基本过程

8.1.1　结构断裂介绍

1．断裂力学定义

许多结构和零部件中都存在微观裂纹和缺陷，这些裂纹和缺陷往往会导致灾难性的后果。断裂力学的工程应用领域就是针对这些裂纹或缺陷的扩展，建立一个明确的概念。

断裂力学是研究受载结构中裂纹的扩展过程，并对相关的实验结果进行验证。通常是通过计算裂纹区域的断裂参数来进行预测的，如应力强度因子，它能估算裂纹扩展的速率。一般情况下，裂纹的扩展程度是随着作用在构件上的循环载荷次数而增加的。例如，飞机机舱中裂纹的扩展过程与机舱的加压和减压过程密切相关。此外，环境条件如温度、大范围的辐射都会影响材料的断裂性能。

2．典型断裂参数

典型的断裂参数如下。

- 伴随着三种基本断裂模型的应力强度因子（K_I、K_{II}、K_{III}），如图 8-1 所示。

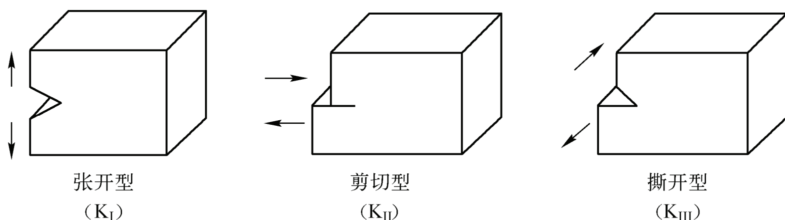


图 8-1　三种基本的断裂模型

- J 积分，它定义为与积分路径无关的线积分，能度量裂纹尖端附近奇异的应力与应变强度。
- 能量释放率，它反映裂纹张开或闭合时消耗功的大小。

8.1.2 结构断裂分析过程

求解断裂力学问题的步骤，是先进行弹性分析或弹塑性静力分析，然后再用特殊的后处理命令，或宏命令计算所需的断裂参数，有关弹性分析或弹塑性静力分析的具体过程可参阅第 3 章的结构线性静力分析和第 5 章的非线性分析基本过程。下面详细讨论两个主要的处理断裂力学的过程：裂纹区域的模拟和计算断裂参数。

1．裂纹区域的模拟

在断裂模型中最重要的区域是围绕裂纹边缘的部位，通常将二维模型的裂纹尖端作为裂纹的边缘，将三维模型的裂纹前缘作为裂纹的边缘，如图 8-2 所示。

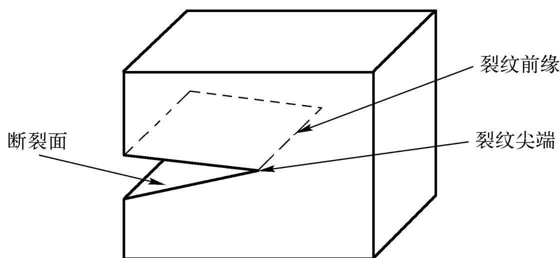


图 8-2　裂纹尖端和裂纹前缘示意图

在线弹性问题中，裂纹尖端或裂纹前缘附近某点的位移随 $r^{1/2}$ 的变化而变化，r 是裂纹尖端到该点的距离。裂纹尖端处的应力和应变是奇异的，随 $r^{1/2}$ 变化，因此，围绕裂纹尖端的有限元单元应是二项式的奇异单元，即把单元边上的中点放到 1/4 边上。

（1）二维断裂模型

适用于二维断裂模型的单元是 PLANE183，它属于 8 节点四边形单元或 6 节点三角形单元，围绕裂纹尖端的第一行单元必须具有奇异性，ANSYS 采用 KSCON 命令指定单元围绕关键点分割排列，自动产生奇异单元。

Command：KSCON

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜Size Cntrls｜Concentrat KPs｜Create

GUI：Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜Size Cntrls｜Concentrat KPs｜List

该命令还具有控制单元第一行的半径、控制周围单元数目等功能。图 8-3 是采用该命令产生的断裂模型。

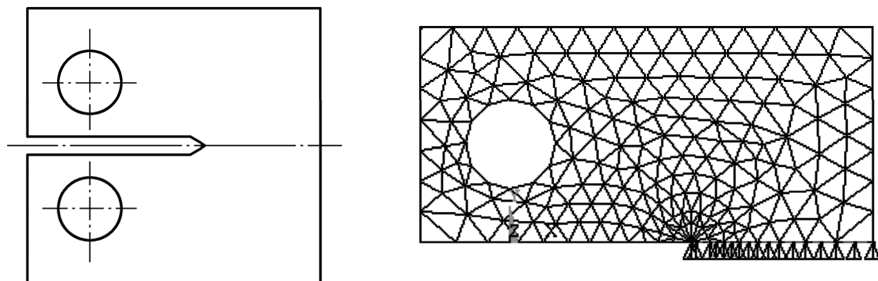


图 8-3　断裂试件及其二维断裂模型

在创建二维断裂模型的过程中，应注意以下问题。

- 尽可能利用对称条件，在许多条件下根据对称（见图 8-4a）或反对称条件（见图 8-4b），只需模拟裂纹区域的一半。

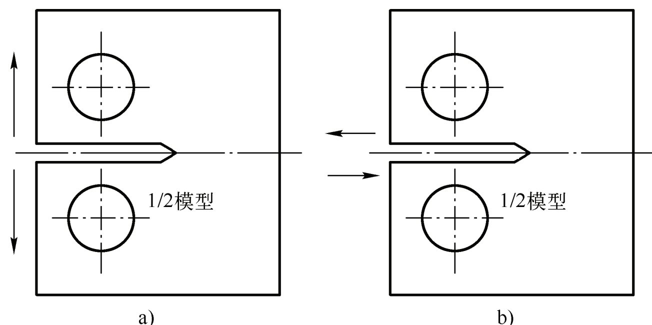


图 8-4 利用对称条件建立模型

- 为获得理想的计算结果，围绕裂纹尖端的单元第一行，其半径应该是 1/8 裂纹长度或更小。裂纹周围的单元角度应在 30°～40°之间。
- 裂纹尖端的单元不能有畸变，最好选择等腰三角形。

（2）三维断裂模型

三维模型推荐使用单元类型为 SOLID186，该单元属于 20 节点块体单元，围绕裂纹前缘的第一行单元应为奇异单元，这种单元是模型生成的，是将 KLPO 面合并成 KO 线。产生三维断裂模型要比二维模型复杂，且命令 KSCON 不能用于三维模型。在建模时，必须确定裂纹前缘是沿着单元的 K 边。

三维模型划分网格时应注意以下问题。

- 推荐使用的单元尺寸与二维模型一样，单元边上节点应在边的 1/4 处。
- 所有裂纹边都应是直线。
- 对曲线裂纹沿裂纹前缘的大小取决于局部曲率的数值，大致使裂纹前缘中每个单元只有 15°～30°的角度。

2．计算断裂参数

在静态分析完成之后，就可以使用通用后处理器 POST1 来计算断裂参数，如应力强度因子、J 积分、能量释放率。

（1）应力强度因子

用 POST1 中的 KCALC 命令计算复合型断裂中的应力强度因子 K_I、K_{II}、K_{III}，该命令仅适用于在裂纹区域附近具有各向同性材料的线弹性问题。使用 KCALC 命令的步骤如下。

- 定义描述裂纹尖端的局部坐标系

要求 X 坐标轴平行于裂纹面，Y 坐标轴垂直于裂纹面。

Command：LOCAL（CLOCAL、CS、CSKP）

GUI：Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At Specified Loc

- 定义沿裂纹面的路径

应以裂纹尖端作为路径的第 1 点，对于半个裂纹模型而言，沿裂纹面需再定义 2 个附加点，对于整体模型而言，需再定义 4 个附加点，其中 2 个点沿一个裂纹面，另外 2 个点沿另

一个裂纹附加面。

Command：PATH，PPATH

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path

- 计算裂纹尖端应力强度因子

使用 KCALC 命令需指定分析类型是平面应力或平面应变，对于薄板的分析，可定义为平面应力，对于其他分析，在裂纹尖端附近和它的渐近位置，其应力一般考虑为平面应变。同时还需指定模型是具有对称边界条件的半裂纹模型或具有反对称边界条件的半裂纹模型，或是整体裂纹模型。

Command：KCALC

GUI：Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Stress Int Factr

（2）J 积分

J 积分可以定义为与路径无关的曲线积分，它表征裂纹尖端附近的奇异应力和应变方程，式（8.1）是二维情况下的定积分表达式：

$$J=\int \gamma\omega dy-\int\left(t_x\frac{\partial u_x}{\partial x}+t_y\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)ds \qquad (8.1)$$

式（8.1）中，各参数意义如下。

γ：围绕裂纹尖端的积分路径；

ω：应变能密度（单位体积的应变能）；

t_x：X 轴的引力向量，$t_x=\sigma_x n_x+\sigma_{xy}n_y$，其中 n 为路径 γ 的单位外法线向量；

t_y：Y 轴的引力向量，$t_y=\sigma_y n_y+\sigma_{xy}n_x$；

σ：应力分量；

u：位移向量；

s：路径 γ 的距离。

下面列出了计算 J 积分的具体步骤。

- 读入结果

Command：SET

GUI：Main Menu | General Postproc | Last Set

- 存储每个单元的应变能和体积

Command：ETABLE

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table

- 计算每个单元的应变能密度

Command：SEXP

GUI：Main Menu | General Postproc | Element Table | Exponentiate

- 定义线积分路径

Command：PATH，PPATH

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path

- 将应变能密度映射到路径上

Command：PDEF

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Map Onto Path

● 对 Y 轴积分

Command：PCALC

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Intergrate

● 将积分结果赋值给参数，该计算结果为式（8.1）中的第一项，即 $\int \gamma\omega dy$

Command： *GET，Name，PATH，，LAST

GUI：Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data

● 将应力分量 SX、SY、SXY 映射到路径上

Command：PDEF

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Map Onto Path

● 定义路径单位法向量

Command：PVECT

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Unit Vector

● 计算式（8.1）中的 t_x 和 t_y

Command：PCALC

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Add

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Devide

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Multiply

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Sine

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Cosine

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | ArcSine

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | ArcCosine

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Nateral Log

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Exponentiate

● 计算位移向量的导数 $\partial u_x / \partial x$ 和 $\partial u_y / \partial y$

Command：PCALC

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Differentiate

● 计算 J 积分的第二项，即 $\int\left(t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y}\right)ds$

Command：PCALC

GUI：Main Menu | General Postproc | Path Operations | Integrate

8.2 结构断裂分析实例详解——二维断裂问题

8.2.1 问题描述

图 8-5 所示为一断裂试样结构示意图，厚度为 5mm，试计算其应力强度因子。

试样材料参数：弹性模量 E=220GPa；泊松比ν=0.25

载荷：P=0.12MPa

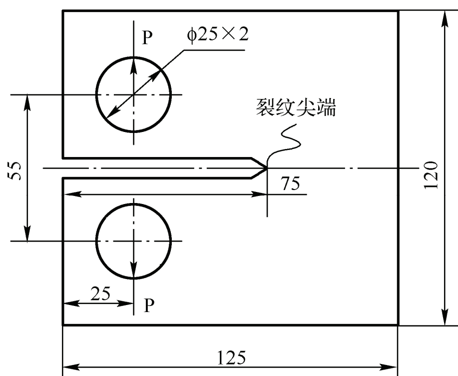


图 8-5　断裂试样结构示意图

提示：建模过程中长度单位采用 mm，应力单位采用 MPa。

8.2.2 问题分析

由于长度和宽度方向的尺寸远大于厚度方向的尺寸，且所承受的载荷位于长宽方向所构成的平面内，因此该问题满足平面应力问题的条件，可以简化为平面应力问题进行求解。

根据对称性，取整体模型的 1/2 建立几何模型；选择 6 节点三角形单元 PLANE183 模拟加载过程。

先进行普通结构分析求解，再采用特殊的后处理命令计算断裂参数。

8.2.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 ANALYSIS OF THE STRESS INTENSITY FACTOR，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Element Type | Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 8 node 183，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 8-6 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

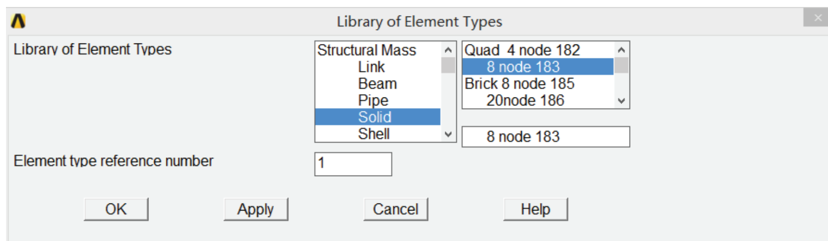


图 8-6　单元类型列表对话框

3）单击 Element Types 对话框上的 Options 按钮，出现 PLANE183 element type options 对话框，在 Element behavior K3 下拉菜单中选择 Plane strs w/thk，其余选项采用默认设置，如图 8-7 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

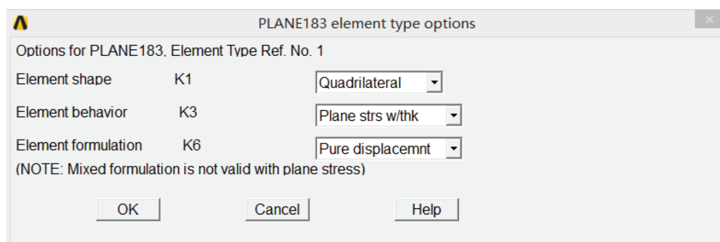


图 8-7　PLANE183 单元关键字设置对话框

4）单击 Element Types 对话框上的 Close 按钮，关闭该对话框。

5）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Real Constants｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Real Constants 对话框，单击 Add 按钮，出现 Element Type for Real Constants 对话框，单击 OK 按钮，出现 Real Constant Set Number 1，for PLANE183 对话框，在 Real Constant Set No.输入栏中输入 1，在 Thickness THK 输入栏中输入 5，如图 8-8 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

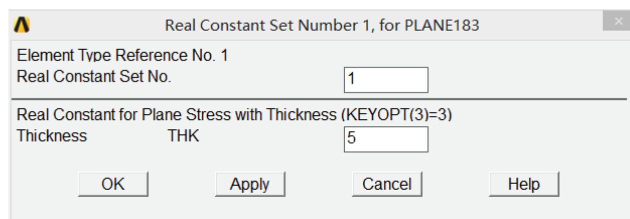


图 8-8　PLANE183 单元实常数设置对话框

6）单击 Real Constants 对话框上的 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Material Props｜Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 2.2E5，在 PRXY 输入栏中输入 0.25，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material｜Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建几何模型、划分网格

1）选择 Utility Menu｜PlotCtrls｜Numbering 命令，出现 Plot Numbering Controls 对话框，选择 KP Keypoint numbers、LINE Line numbers 和 AREA Area numbers 选项，使其状态从 Off 变为 On，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：在几何模型中显示关键点、线段和面编号。

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Keypoints | In Active CS 命令，出现 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT Keypoint number 输入栏中输入 1，在 X,Y,Z Location in active CS 输入栏中分别输入 50、0、0，如图 8-9 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

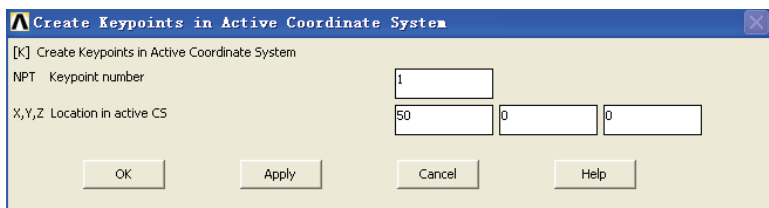


图 8-9 生成关键点对话框

3）参照上一步的操作过程，依次在 ANSYS 显示窗口生成以下关键点编号及坐标：

2（100，0，0）；3（100，60，0）；4（-25，60，0）；5（-25，0，0）；

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Lines | Lines | Straight Line 命令，出现 Create Straight 拾取菜单，用鼠标在 ANSYS 显示窗口依次选择编号为 1、2，2、3，3、4，4、5，5、1 的关键点生成 5 条线段，单击 OK 按钮关闭该菜单。

技巧：可通过在 Create Straight 拾取菜单的输入栏中输入相应的关键点编号并单击 Accept 按钮生成线段。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Arbitrary | By Lines 命令，出现 Create Area by L 拾取菜单，在输入栏中输入 5，1，2，3，4，单击 OK 按钮关闭该菜单。

提示：线段编号不同的输入次序会影响到生成面的法线方向。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | Solid Circle 命令，出现 Solid Circular Area 对话框，在 WP X 输入栏中输入 0，在 WP Y 输入栏中输入 27.5，在 Radius 输入栏中输入 12.5，如图 8-10 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Subtract | Areas 命令，出现 Subtract Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label Item to be compressed 下拉菜单中选择 Areas，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：压缩所有实体编号，如在一系列操作之后，线段编号可能为 1，2，4，6，7，9…，进行此步操作之后，线段编号将恢复为 1，2，3，4，5，6，7…。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label Type of item to be merged 下拉选框中选择 All，如图 8-11 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

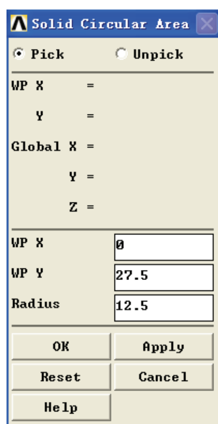


图 8-10 生成圆面对话框

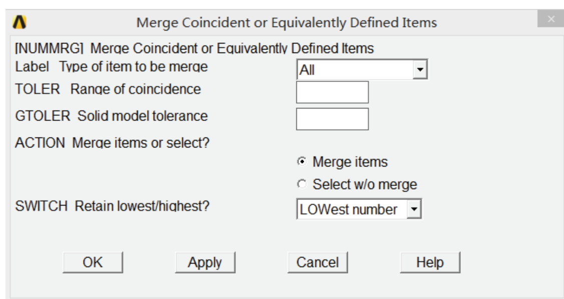


图 8-11 合并同位置实体对话框

提示：合并相同位置上重复定义的实体。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | Concentrat KPs | Create 命令，出现 Concentration Keypoint 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Concentration Keypoint 对话框，参照图 8-12 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

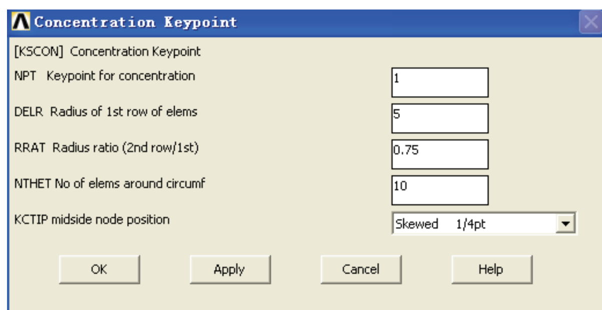


图 8-12 中心点设置对话框

11）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 SIZE Element edge length 输入栏中输入 3，其余选项采用默认设置，如图 8-13 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

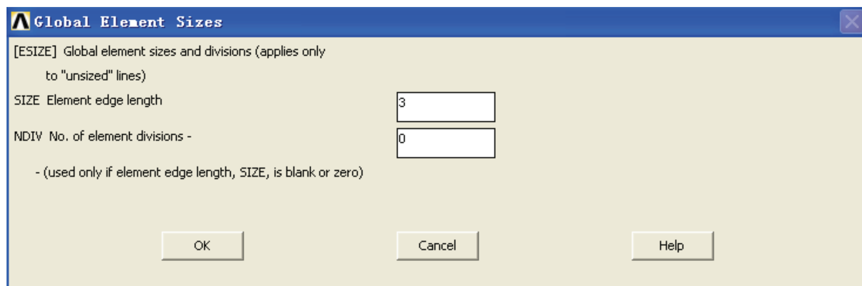


图 8-13 单元尺寸设置对话框

12）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

13）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示网格划分结果，如图 8-14 所示。

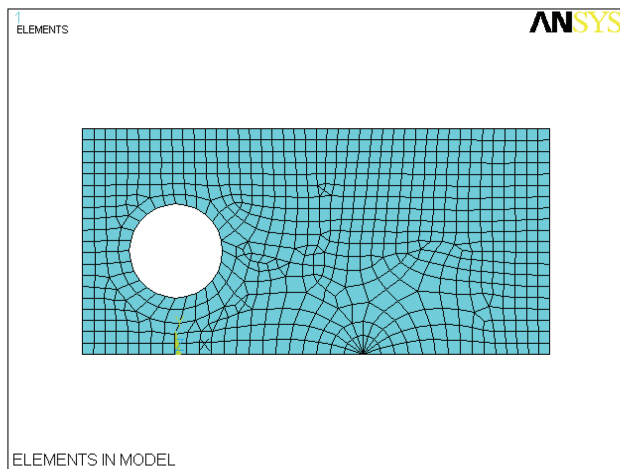


图 8-14　网格划分结果显示

14）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

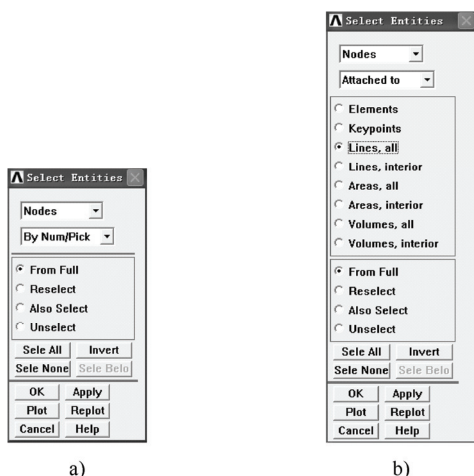
2）选择 Utility Menu | Plot | Lines 命令，显示所有线段。

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Lines，在第 2 个下拉菜单中选择 By Num/Pick，在第 3 栏中选择 From Full，如图 8-15a 所示，单击 OK 按钮，出现 Select Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该菜单。

4）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉菜单中选择 Nodes，在第 2 个下拉菜单中选择 Attached to，在第 3 栏中选择 Lines,all，在第 4 栏中选择 From Full，如图 8-15b 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择编号为 1 的线段上的节点。

5）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2　DOFs to be constrained 列表框中选择 UY，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE　Displacement value 输入栏中输入 0，如图 8-16 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



a) b)

图 8-15 选择实体对话框

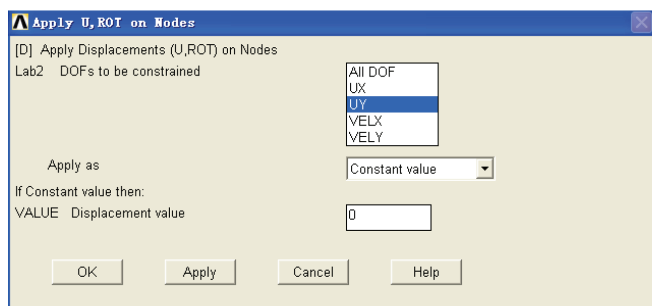


图 8-16 施加位移约束对话框

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Keypoints 命令，出现 Apply U,ROT on KPs 拾取菜单，在输入栏中输入 2，出现 Apply U,ROT on KPs 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UX，在 Apply as 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines 命令，出现 Apply PRES on Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 6，单击 OK 按钮，出现 Apply PRES on lines 对话框，在［SFL］ Apply PRES on lines as a 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 0，在 Value 输入栏中输入 0.12，如图 8-17 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Lines 命令，出现 Apply PRES on Lines 拾取菜单，在输入栏中输入 7，单击 OK 按钮，出现 Apply PRES on lines 对话框，在［SFL］ Apply PRES on lines as a 下拉菜单中选择 Constant value，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入 0.12，在 Value 输入栏中输入 0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

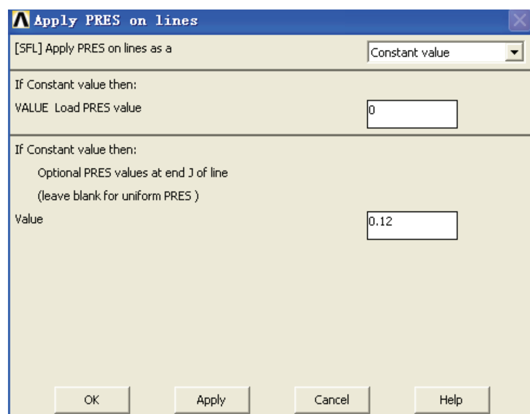


图 8-17　施加压力载荷对话框

10）选择 Utility Menu｜WorkPlane｜Local Coordinate Systems｜Create Local CS｜At Specified Location 命令，出现 Create CS at Location 拾取菜单，在输入栏中输入 50，0，0，单击 OK 按钮，出现 Create Local CS at Specified Location 对话框，参照图 8-18 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

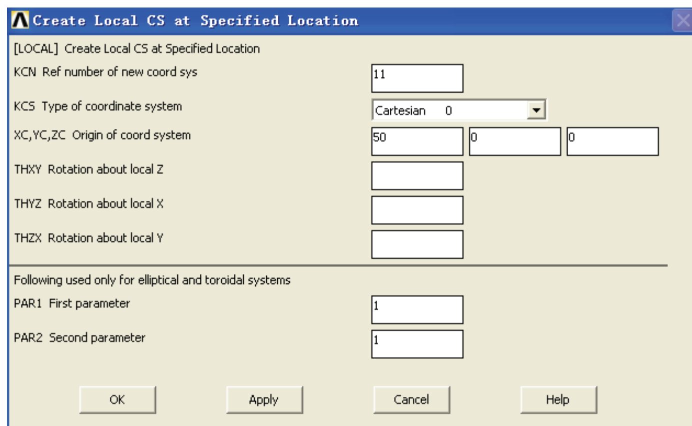


图 8-18　创建局部坐标系对话框

11）选择 Main Menu｜Solution｜Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

提示：若出现 Verify 对话框，可单击其上的 Yes 按钮关闭该对话框继续求解过程。

12）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

13）选择 Utility Menu｜File｜Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE1-2.db，保存求解结果，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．查看求解结果

1）选择 Main Menu｜General Postproc｜Plot Results｜Contour Plot｜Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution

| DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-19 所示的合位移等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，在 Item to be contoured 列表框中选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-20 所示的等效应力等值线图。

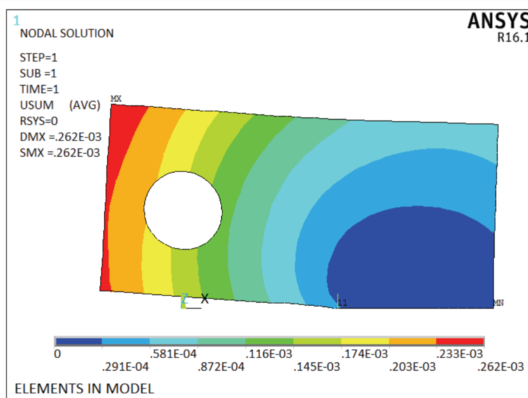


图 8-19　合位移等值线图

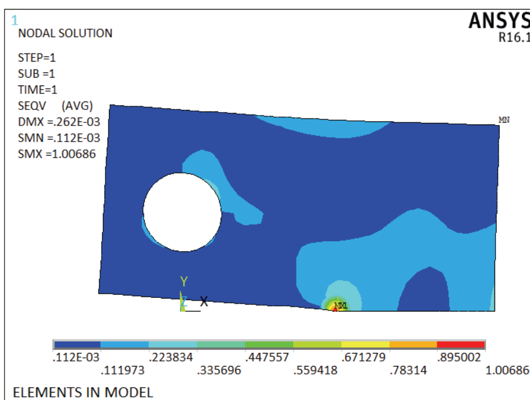
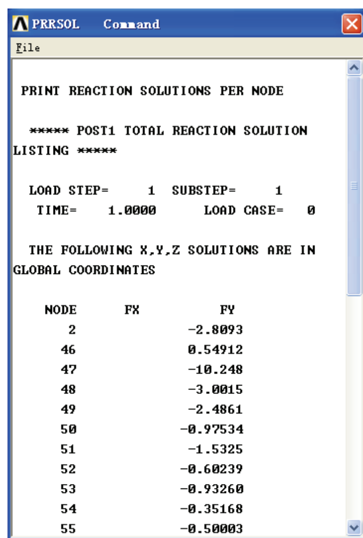


图 8-20　等效应力等值线图

提示：输出应力单位为 MPa。

3）选择 Main Menu | General Postproc | List Results | Reaction Solu 命令，出现 List Reaction Solution 对话框，在 Lab　Item to be listed 列表框中选择 All items，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示支反力结果，如图 8-21 所示。



PRRSOL　Command

File

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

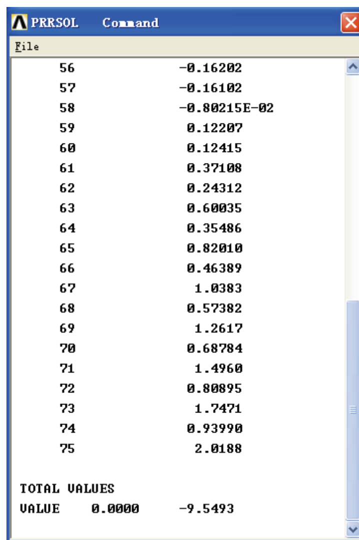
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	FX	FY
2		-2.8093
46		0.54912
47		-10.248
48		-3.0015
49		-2.4861
50		-0.97534
51		-1.5325
52		-0.60239
53		-0.93260
54		-0.35168
55		-0.50003

a)



PRRSOL　Command

File

56	-0.16202
57	-0.16102
58	-0.80215E-02
59	0.12207
60	0.12415
61	0.37108
62	0.24312
63	0.60035
64	0.35486
65	0.82010
66	0.46389
67	1.0383
68	0.57382
69	1.2617
70	0.68784
71	1.4960
72	0.80895
73	1.7471
74	0.93990
75	2.0188

TOTAL VALUES
VALUE 0.0000 -9.5493

b)

图 8-21　列表显示支反力结果

4）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | By Nodes 命令，出现 By Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 2，35，33，单击 OK 按钮，出现 By Nodes 对话框，在 Name Define Path Name:输入栏中输入 DF，其余选项采用默认设置，如图 8-22 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | Path Status | Current Path 命令，ANSYS 将显示当前路径，如图 8-23 所示。

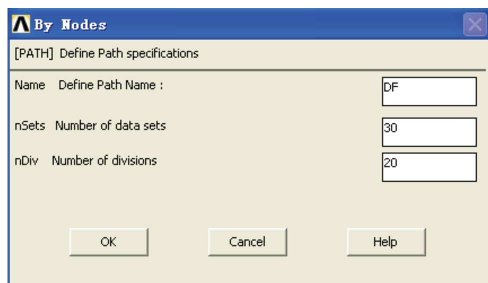


图 8-22 通过节点定义路径

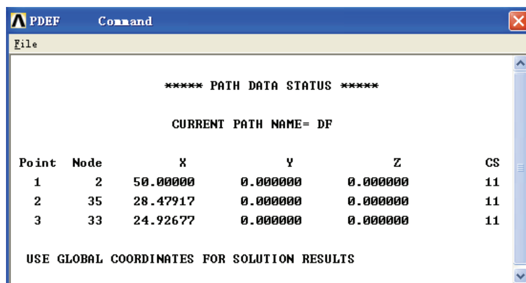


图 8-23 显示当前路径

6）选择 Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Stress Int Factr 命令，出现 Stress Intensity Factor 对话框，参照图 8-24 对其进行设置，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示应力强度因子计算结果，如图 8-25 所示。

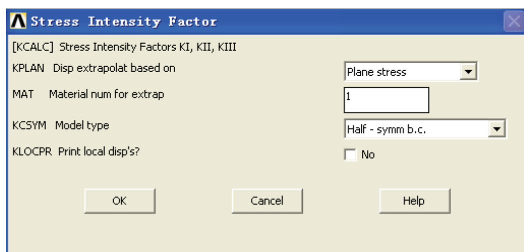


图 8-24 计算应力强度因子

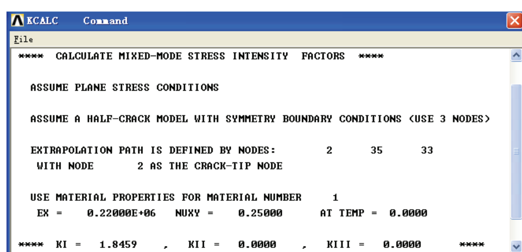


图 8-25 应力强度因子计算结果显示

7）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：将两个小孔的尺寸都调整为ϕ20，其余条件不变（包括孔间距），求该结构的应力强度因子，并比较求解结果有无变化。

8.2.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE1                                  ！定义工作文件名
/TITLE，ANALYSIS OF THE STRESS INTENSITY FACTOR
                                                     ！定义工作标题
/PREP7                                               ！进入前处理器
ET，1，PLANE183                                      ！指定单元类型
KEYOPT，1，3，3                                      ！设置单元关键字
R，1，5                                              ！定义单元实常数
```



```
MP，EX，1，2.2E5                          ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.25                         ！输入泊松比

/PNUM，KP，1                              ！显示关键点编号
/PNUM，LINE，1                            ！显示线段编号
/PNUM，AREA，1                            ！显示面编号
K，1，50                                  ！生成关键点
K，2，100
K，3，100，60
K，4，-25，60
K，5，-25
L，1，2                                   ！生成线段
L，2，3
L，3，4
L，4，5
L，5，1
AL，5，1，2，3，4                         ！由线段生成面
CYL4，0，27.5，12.5                       ！生成圆面
ASBA，1，2                                ！面相减操作
NUMCMP，AREA                              ！压缩面编号
NUMMRG，ALL                               ！合并同位置实体
KSCON，1，5，1，10，0.75                  ！定义裂纹尖端
ESIZE，3，0                               ！定义单元尺寸
MSHKEY，0
AMESH，1                                  ！对面进行网格划分
/TITLE，ELEMENTS IN MODEL
EPLOT                                     ！显示单元
SAVE
FINISH

/SOLU                                     ！进入求解器
ANTYPE，STATIC
LPLOT                                     ！显示线段
LSEL，S，，，1                            ！选择线段
NSLL，S，1                                ！选择线段上的所有节点
D，ALL，UY                                ！施加位移载荷
DK，2，UX
ALLSEL                                    ！选择所有实体
SFL，6，PRES，0，0.12                     ！在线段上施加压力载荷
SFL，7，PRES，0.12，0
LOCAL，11，0，50，0，0，，，，1，1         ！创建局部坐标系
SOLVE                                     ！开始求解计算
SAVE
FINISH

/POST1                                    ！进入 POST1 后处理器
PLNSOL，U，SUM                            ！绘制合位移场等值线图
PLNSOL，S，EQV                            ！绘制等效应力场等值线图
PRRSOL                                    ！列表显示支反力求解结果
PATH，DF，3，30，20                       ！定义路径
```

```
PPATH，1，2                              ! 设置路径点
PPATH，2，35
PPATH，3，33
PDEF，STAT                               ! 显示当前路径
KCALC，1，1，0，0                        ! 计算应力强度因子
FINISH
/EXIT，ALL                               ! 退出 ANSYS
```

8.3 结构断裂分析实例详解——具有中心裂纹的板状试样三维断裂分析

8.3.1 问题描述

图 8-26 所示为一个具有中心裂纹的板状拉伸试样，试计算其应力强度因子。

试样几何参数：a=1in；b=5in；t=0.25in

试样材料参数：弹性模量 E=30×10^6psi；泊松比ν=0.3

载荷：σ_0=0.56psi

提示：建模及求解过程中均采用英制单位。

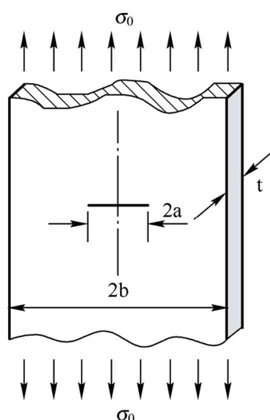


图 8-26　试样结构示意图

8.3.2 问题分析

根据对称性，取整体模型的 1/4，沿宽度方向取 5in 建立几何模型。

选择 SOLID185 单元模拟加载过程。

采用下列两种方法计算应力强度因子：采用 KCALC 后处理命令直接计算；通过 J 积分进行计算。

注意：ANSYS 16.1 版本已不再支持本书第 3 版中使用的基于 ANSYS 12.0 的 PLANE42、SOLID45、SOLID95 单元。

8.3.3 求解步骤

1．定义工作文件名和工作标题

1）选择 Utility Menu | File | Change Jobname 命令，出现 Change Jobname 对话框，在［/FILNAM］ Enter new jobname 输入栏中输入工作文件名 EXERCISE2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Utility Menu | File | Change Title 命令，出现 Change Title 对话框，在输入栏中输入 FRACTURE MECHANIC STRESS INTENSITY—CRACK IN A FINITE WIDTH PLATE，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2．定义单元类型

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Element Type｜Add/Edit/Delete 命令，出现 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，出现 Library of Element Types 对话框。

2）在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Quad 4 node 182，在 Element type reference number 输入栏中输入 1，如图 8-27 所示，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 8 node 185，在 Element type reference number 输入栏中输入 2，单击 Apply 按钮，在 Library of Element Types 列表框中选择 Structural Solid，Brick 20 node 186，在 Element type reference number 输入栏中输入 3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

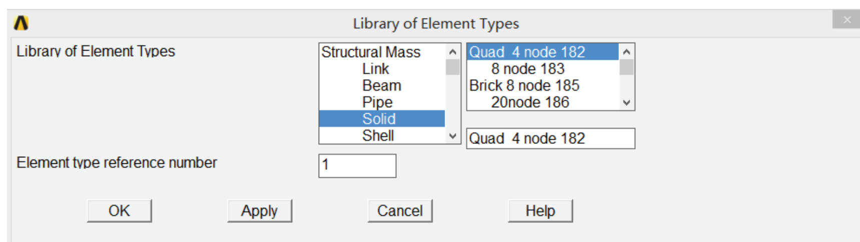


图 8-27 单元类型列表对话框

3）在 Element Types 对话框上单击 Close 按钮关闭该对话框。

3．定义材料性能参数

1）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Material Props｜Material Models 命令，出现 Define Material Model Behavior 对话框。

2）在 Material Models Available 一栏中依次单击 Structural、Linear、Elastic、Isotropic 选项，出现 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，在 EX 输入栏中输入 3E7，在 PRXY 输入栏中输入 0.3，单击 OK 按钮关闭该对话框。

3）在 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Material｜Exit 命令，关闭该对话框。

4．创建宏文件

在 ANSYS 命令输入栏中输入以下命令：

```
*CREATE，FRACT，MAC
NSEL，ALL
*GET，N，NODE，，NUM，MAX
CMSEL，S，CRACKTIP
ESLN
*GET，ELMAX，ELEM，，NUM，MAX
*DO，IEL，1，ELMAX
ELMI=IEL
*IF，ELMI，LE，0，EXIT
*GET，ELTYPE，ELEM，ELMI，ATTR，TYPE
*IF，ELTYPE，NE，ARG1，CYCLE
N3 = NELEM(ELMI，3)
*IF，NSEL(N3)，LE，0，CYCLE
N7 = NELEM(ELMI，7)
```

```
*IF，NSEL(N7)，LE，0，CYCLE
N1 = NELEM(ELMI，1)
N2 = NELEM(ELMI，2)
N5 = NELEM(ELMI，5)
N6 = NELEM(ELMI，6)
X3 = 0.75*NX(N3)
Y3 = 0.75*NY(N3)
Z3 = 0.75*NZ(N3)
X = 0.25*NX(N2)+ X3
Y = 0.25*NY(N2)+ Y3
Z = 0.25*NZ(N2)+ Z3
N = N + 1
N10 = N
N，N10，X，Y，Z
X = 0.25*NX(N1)+ X3
Y = 0.25*NY(N1)+ Y3
Z = 0.25*NZ(N1)+ Z3
N = N + 1
N12= N
N，N12，X，Y，Z
X7 = 0.75*NX(N7)
Y7 = 0.75*NY(N7)
Z7 = 0.75*NZ(N7)
X = 0.25*NX(N6)+ X7
Y = 0.25*NY(N6)+ Y7
Z = 0.25*NZ(N6)+ Z7
N = N + 1
N14 = N
N，N14，X，Y，Z
X = 0.25*NX(N5)+ X7
Y = 0.25*NY(N5)+ Y7
Z = 0.25*NZ(N5)+ Z7
N = N + 1
N16 = N
N，N16，X，Y，Z
N4=N3
N8=N7
NSEL，ALL
TYPE，3
EN，ELMI，N1，N2，N3，N4，N5，N6，N7，N8
EMORE，0，N10，0，N12，0，N14，0，N16
EMORE，
*ENDDO
CMSEL，U，CRACKTIP
NUMMRG，NODE
NSEL，ALL
ESEL，ALL
/GOPR
*END
```

```
*CREATE，JIN1，MAC
STINFC
SEXP，W，SENE，VOLU，1，-1
PATH，JINT，4，50，48
PPATH，1，ARG1
PPATH，2，ARG2
PPATH，3，ARG3
PPATH，4，ARG4
PDEF，W，ETAB，W
PCALC，INTG，J，W，YG
*GET，JA，PATH，，LAST，J
PDEF，CLEAR
PVECT，NORM，NX，NY，NZ
PDEF，INTR，SX，SX
PDEF，INTR，SY，SY
PDEF，INTR，SXY，SXY
PCALC，MULT，TX，SX，NX
PCALC，MULT，C1，SXY，NY
PCALC，ADD，TX，TX，C1
PCALC，MULT，TY，SXY，NX
PCALC，MULT，C1，SY，NY
PCALC，ADD，TY，TY，C1
*GET，DX，PATH，，LAST，S
DX=DX/100
PCALC，ADD，XG，XG，，，，-DX/2
PDEF，INTR，UX1，UX
PDEF，INTR，UY1，UY
PCALC，ADD，XG，XG，，，，DX
PDEF，INTR，UX2，UX
PDEF，INTR，UY2，UY
PCALC，ADD，XG，XG，，，，-DX/2
C=(1/DX)
PCALC，ADD，C1，UX2，UX1，C，-C
PCALC，ADD，C2，UY2，UY1，C，-C
PCALC，MULT，C1，TX，C1
PCALC，MULT，C2，TY，C2
PCALC，ADD，C1，C1，C2
PCALC，INTG，J，C1，S
*GET，JB，PATH，，LAST，J
JINT=2*(JA-JB)
PDEF，CLEAR
*END
```

提示：创建生成裂纹尖端奇异单元和计算 J 积分的宏文件时，每输完一条命令后需要单击键盘上的〈Enter〉键确认，但*CREATE 和*END 之间的命令并不立即执行。注意，命令中的符号需用英文字体。

5．创建几何模型、划分网格

1）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Rectangle | By

Dimensions 命令，出现 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1,X2　X-coordinates 输入栏中分别输入-1、4，在 Y1,Y2　Y-coordinates 输入栏中分别输入 0、5，如图 8-28 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

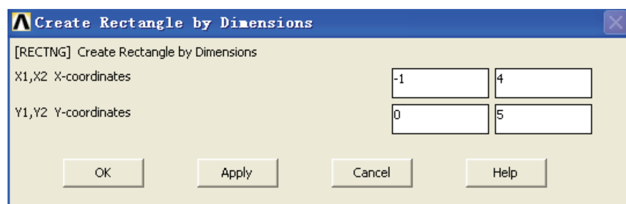


图 8-28　创建矩形面对话框

2）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Create | Areas | Circle | By Dimensions 命令，出现 Circular Area by Dimensions 对话框，在 RAD1　Outer radius 输入栏中输入 0.6，在 RAD2　Optional inner radius 输入栏中输入 0.06，在 THETA1　Starting angle（degrees）输入栏中输入 0，在 THETA2　Ending angle（degrees）输入栏中输入 90，如图 8-29 所示，单击 Apply 按钮，在 THETA1　Starting angle（degrees）输入栏中输入 90，在 THETA2　Ending angle（degrees）输入栏中输入 180，单击 OK 按钮关闭该对话框。

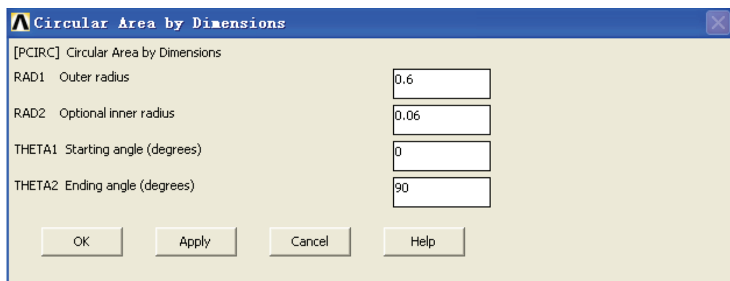


图 8-29　创建圆面对话框

3）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Booleans | Overlap | Areas 命令，出现 Overlap Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

4）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label　Item to be compressed 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

5）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 4，5，6，7，8，9，11，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV　No. of element divisions 输入栏中输入 8，如图 8-30 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Mesh | Areas | Free 命令，出现 Mesh Areas 拾取菜单，在输入栏中输入 1，3，单击 OK 按钮关闭该菜单。网格划分结果如图 8-31 所示。

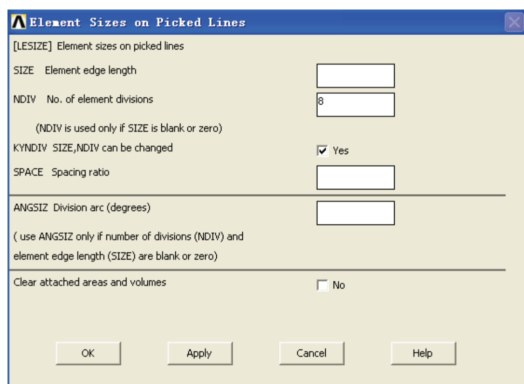


图 8-30 线段等分数设置对话框

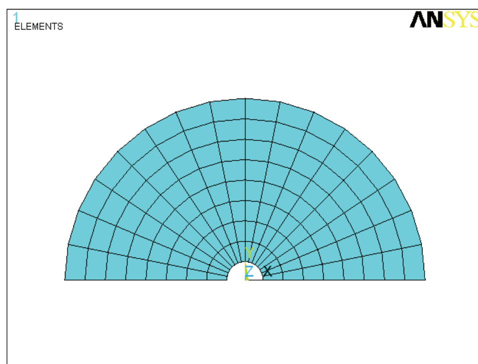


图 8-31 网格划分结果显示

7）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 1，2，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 8，单击 OK 按钮关闭该对话框。

8）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 3，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 8，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 12，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Lines | Picked Lines 命令，出现 Element Size on 拾取菜单，在输入栏中输入 13，单击 OK 按钮，出现 Element Sizes on Picked Lines 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 10，在 SPACE Spacing ratio 输入栏中输入 0.2，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Utility Menu | MenuCtrls | Message Controls 命令，出现 Message Controls 对话框，在 NMERR Max number displayed 输入栏中输入 0，如图 8-32 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。



图 8-32 提示信息控制对话框

12）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Meshing｜Mesh｜Areas｜Mapped｜By Corners 命令，出现 Map Mesh Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 4，单击 OK 按钮，在输入栏中输入 4，9，5，2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

13）选择 Utility Menu｜Plot｜Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示映射网格划分结果，如图 8-33 所示。

提示：下面的操作将生成裂纹前缘单元。

14）选择 Utility Menu｜WorkPlane｜Change Active CS to｜Global Cylindrical 命令，将当前坐标系转变为柱坐标系。

15）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Nodes｜In Active CS 命令，出现 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，在 NODE Node number 输入栏中输入 2000，在 X,Y,Z Location in active CS 后面的 3 个输入栏中分别输入 0、0、0，单击 OK 按钮关闭该对话框。

16）参照上一步的操作过程，分别生成以下节点编号和坐标：

2001（0.06，0，0）； 2021（0.06，11.25，0）； 2100（0，0，0.25）

2101（0.06，0，0.25）； 2120（0.06，11.25，0.25）

17）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Elements｜Elem Attributes 命令，出现 Element Attributes 对话框，在［TYPE］Element type number 下拉选框中选择 2 SOLID185，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

18）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Create｜Elements｜User Numbered｜Thru Nodes 命令，出现 Create Elems User-Num 对话框，在 Number to Assign to element 输入栏中输入 500，单击 OK 按钮，出现 Create Elems User-N 拾取菜单，在输入栏内中输入 2001，2021，2000，2000，2101，2120，2100，2100，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Main Menu｜Preprocessor｜Modeling｜Copy｜Elements｜Auto Numbered 命令，出现 Copy Elems Auto-Num 拾取菜单，在输入栏中输入 500，单击 OK 按钮，出现 Copy Elements（Automatically-Numbered）对话框，在 ITIME Total number of copies—including original 输入栏中输入 16，在 NINC Node number increment 输入栏中输入 200，在 DY（opt）Y-offset in active 输入栏中输入 11.25，如 8-34 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

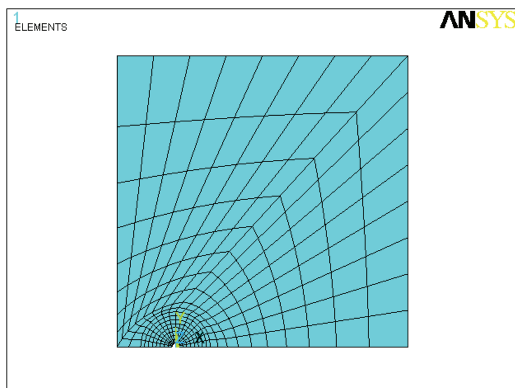


图 8-33 映射网格划分结果显示

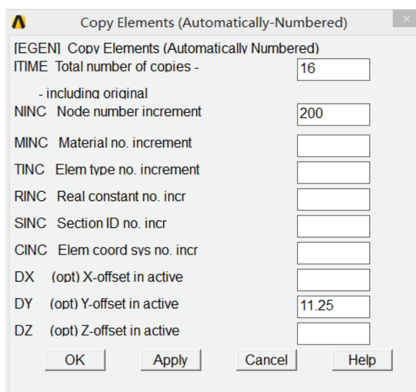


图 8-34 复制单元对话框

20）选择 Utility Menu | PlotCtrls | View Settings | Viewing Direction 命令，出现 Viewing Direction 对话框，在 XV,YV,ZV Coords of view point 的 3 个输入栏中分别输入 1、2、3，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Elements，在第 2 个下拉选框中选择 By Attributes，在第 3 栏中选择 Elem type num，在 Min,Max,Inc 输入栏中输入 2，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

22）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的裂纹前缘单元，如图 8-35 所示。

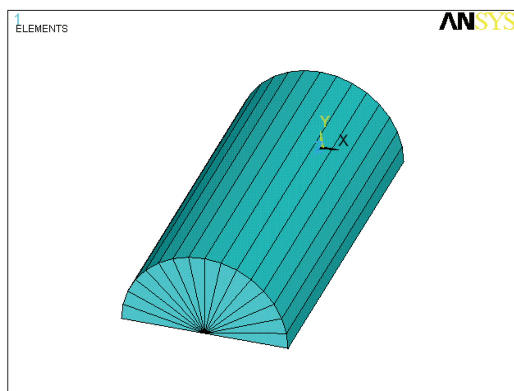


图 8-35 裂纹前缘单元显示

23）选择 Utility Menu | Select | Everythings 命令，选择所有实体。

提示：下面的操作将面单元拖拉生成体单元。

24）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为直角坐标系。

25）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Size Cntrls | ManualSize | Global | Size 命令，出现 Global Element Sizes 对话框，在 NDIV No. of element divisions 输入栏中输入 1，单击 OK 按钮关闭该对话框。

26）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Operate | Extrude | Areas | Along Normal 命令，出现 Extrude Area by 拾取菜单，在输入栏中输入 1，单击 OK 按钮，出现 Extrude Area along Normal 对话框，在 NAREA Area to be extruded 输入栏中输入 1，在 DIST Length of extrusion 输入栏中输入 0.25，如图 8-36 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

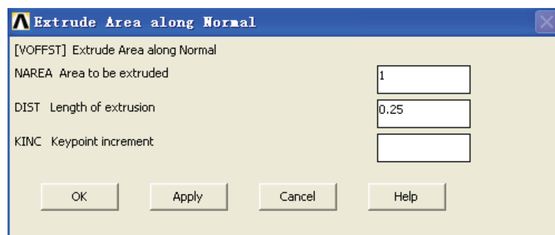


图 8-36 沿法向拖拉面生成体对话框

27）参照第 25）、26）步的操作过程，分别拖拉面 3 和面 4 生成体。

28）选择 Main Menu | Preprocessor | Meshing | Clear | Areas 命令，出现 Clear Areas 拾取菜单，单击 Pick All 按钮关闭该菜单。

29）选择 Utility Menu | Plot | Areas 命令，显示所有面。

30）选择 Main Menu | Preprocessor | Modeling | Delete | Area and Below 命令，出现 Delete Area and 拾取菜单，在输入栏中输入 2，单击 OK 按钮关闭该菜单。

31）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Merge Items 命令，出现 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，在 Label　Type of item to be merged 下拉选框中选择 Nodes，其余选项采用默认设置，单击 Apply 按钮，在 Label　Type of item to be merges 下拉选框中选择 Keypoints，单击 OK 按钮关闭该对话框。

32）选择 Main Menu | Preprocessor | Numbering Ctrls | Compress Numbers 命令，出现 Compress Numbers 对话框，在 Label　Item to be compressed 下拉选框中选择 All，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：下面的操作将裂纹前缘单元进行奇异化处理。

33）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Locations，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 4 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 4 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

34）选择 Utility Menu | Select | Comp/Assembly | Create Component 命令，出现 Create Component 对话框，在 Cname　Component name 输入栏中输入 CRACKTIP，在 Entity　Component is made of 下拉选框中选择 Nodes，如图 8-37 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

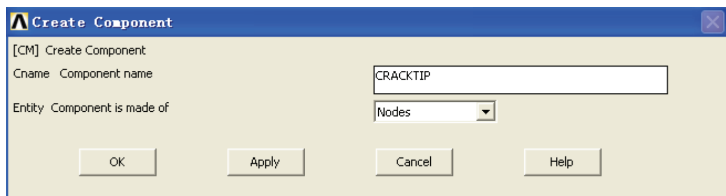


图 8-37　生成组元对话框

35）在命令输入栏中输入 FRACT，2，单击键盘上的〈Enter〉键，开始运行宏文件，将裂纹前缘的单元转变为奇异单元。

36）选择 Utility Menu | MenuCtrls | Message Controls 命令，出现 Message Controls 对话框，在 NMERR　Max number displayed 输入栏中输入 5，单击 OK 按钮关闭该对话框。

37）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Elements，在第 2 个下拉选框中选择 By Attributes，在第 3 栏中选择 Elem type num，在 Min,Max,Inc 输入栏中输入 3，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

38）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示经奇异化处理的裂纹前缘单元，如图 8-38 所示。

39）选择 Utility Menu | Select | Everythings 命令，选择所有实体。

40）选择 Utility Menu | Plot | Elements 命令，ANSYS 显示窗口将显示所生成的有限元模型，如图 8-39 所示。

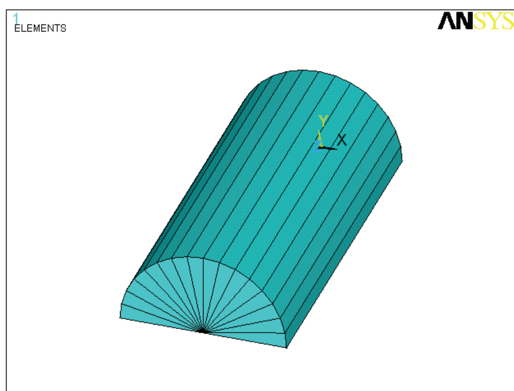


图 8-38　经奇异化处理的裂纹前缘单元显示

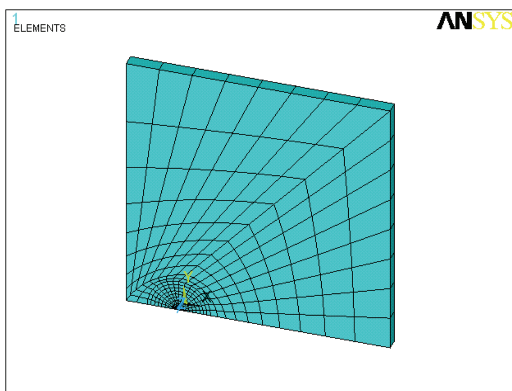


图 8-39　有限元模型显示

41）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-1.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6．加载求解

1）选择 Main Menu | Solution | Analysis Type | New Analysis 命令，出现 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，单击 OK 按钮关闭该对话框。

2）选择 Main Menu | Solution | Load Step Opts | Output Ctrls | Solu Printout 命令，出现 Solution Printout Controls 对话框，在 Item　Item for printout control 下拉选框中选择 All items，在 FREQ　Print frequency 选项中选择 Every substep，其余选项采用默认设置，如图 8-40 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

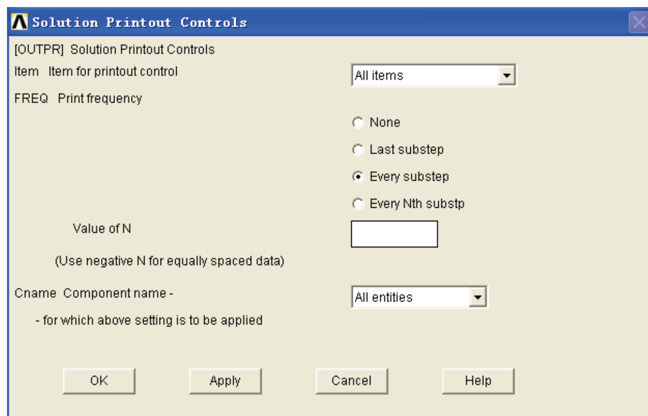


图 8-40　求解输出设置

3）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-1，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

4）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉选框中选择 X-axis，如图 8-41 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

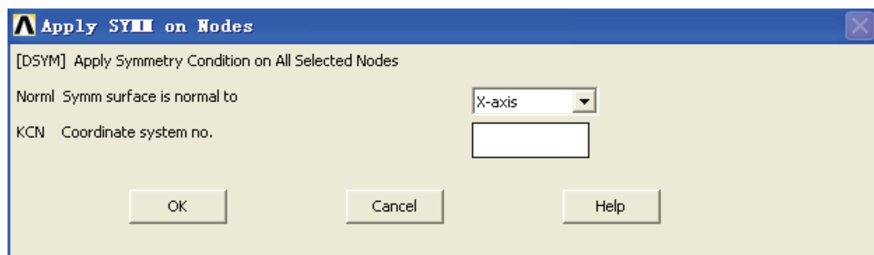


图 8-41 施加对称位移约束对话框

5）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，4，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

6）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | Symmetry B.C. | On Nodes 命令，出现 Apply SYMM on Nodes 对话框，在 Norml Symm surface is normal to 下拉选框中选择 Y-axis，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

8）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Displacement | On Nodes 命令，出现 Apply U,ROT on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply U,ROT on Nodes 对话框，在 Lab2 DOFs to be constrained 列表框中选择 UZ，在 Apply as 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Displacement value 输入栏中输入 0，如图 8-42 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 5，在第 5 栏中选择 From Full，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Main Menu | Solution | Define Loads | Apply | Structural | Pressure | On Nodes 命令，出现 Apply PRES on Nodes 拾取菜单，单击 Pick All 按钮，出现 Apply PRES on nodes 对话框，在［SF］Apply PRES on nodes as a 下拉选框中选择 Constant value，在 VALUE Load PRES value 输入栏中输入-0.56，如图 8-43 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

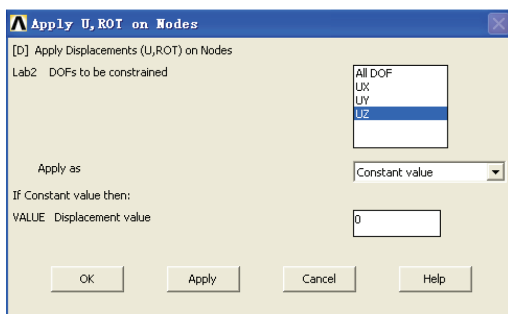


图 8-42 施加位移约束对话框

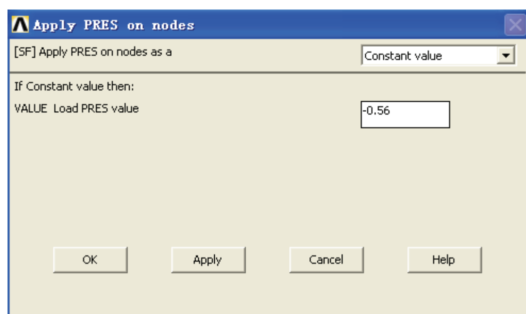


图 8-43 施加压力载荷对话框

11）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

12）选择 Utility Menu | WorkPlane | Local Coordinate Systems | Create Local CS | At WP Origin 命令，出现 Create Local CS at WP Origin 对话框，参照图 8-44 对其进行设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

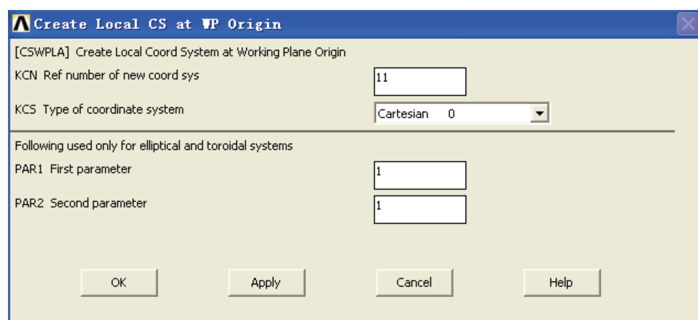


图 8-44 创建局部坐标系对话框

13）选择 Main Menu | Solution | Solve Current LS 命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮，ANSYS 开始求解计算。

14）求解结束时，出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

15）选择 Utility Menu | File | Save as 命令，出现 Save Database 对话框，在 Save Database to 输入栏中输入 EXERCISE2-2.db，保存上述操作过程，单击 OK 按钮关闭该对话框。

7. 查看求解结果

1）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | X-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-45 所示的 X 方向位移等值线图。

2）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Y-Component of displacement，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-46 所示的 Y 方向位移等值线图。



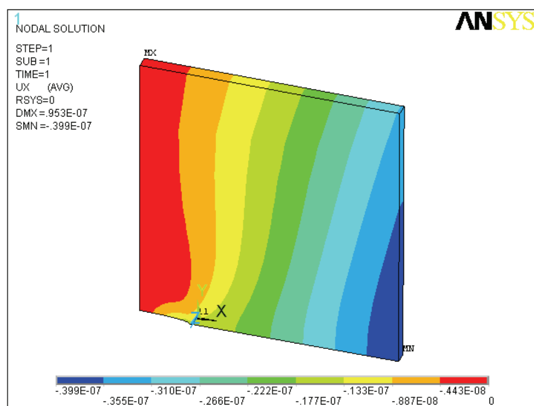


图 8-45　X 方向位移等值线图

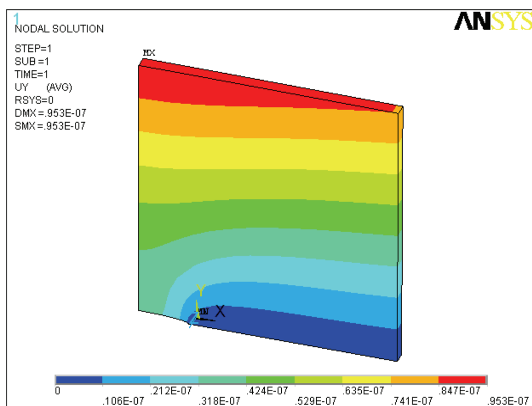


图 8-46　Y 方向位移等值线图

3）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | DOF Solution | Displacement vector sum，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-47 所示的合位移等值线图。

4）选择 Main Menu | General Postproc | Plot Results | Contour Plot | Nodal Solu 命令，出现 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Nodal Solution | Stress | von Mises stress，单击 OK 按钮，ANSYS 窗口将显示如图 8-48 所示的等效应力等值线图。

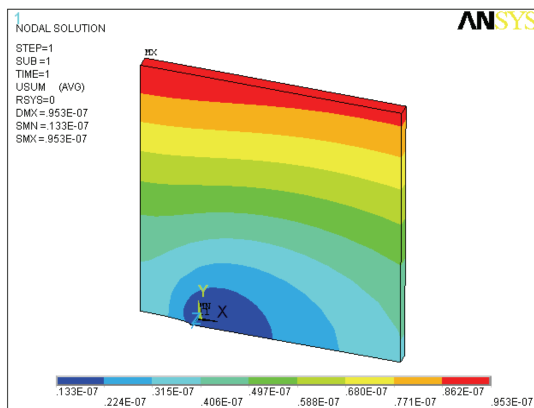


图 8-47　合位移等值线图

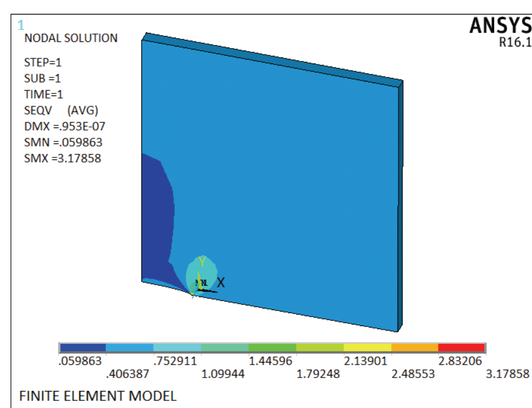


图 8-48　等效应力等值线图

5）选择 Main Menu | General Postproc | Element Table | Define Table 命令，出现 Element Table Data 对话框，如图 8-49 所示，单击 Add 按钮，出现 Define Additional Element Table Items 对话框，在 Lab　User label for item 输入栏中输入 SENE，在 Item, Comp　Results data item 列表框中选择 Energy，Strain enrg SENE，如图 8-50 所示，单击 Apply 按钮，在 Lab　User label for item 输入栏中输入 VOLU，在 Item, Comp　Results data item 列表框中选择 Geometry，Elem volume VOLU，单击 OK 按钮关闭该对话框。

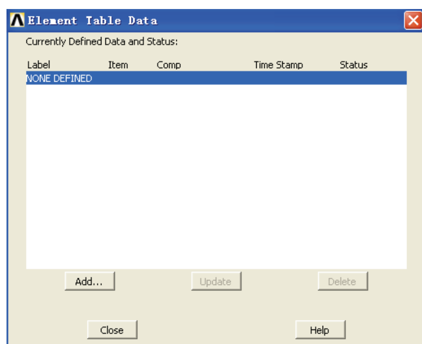


图 8-49　单元信息表对话框

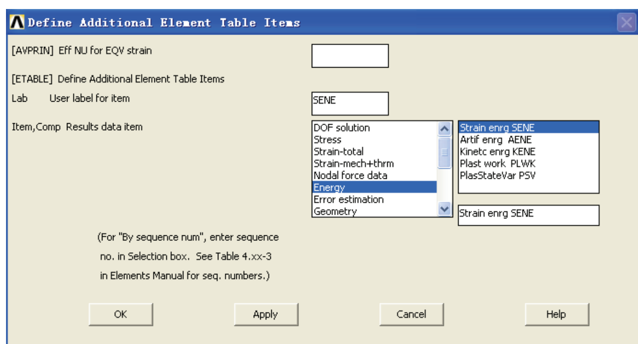


图 8-50　定义单元信息表对话框

6）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：选择 X 坐标值为 0、Y 坐标值为 0 的节点。

7）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE1，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

提示：获取 X 坐标值为 0、Y 坐标值为 0 的节点编号并将其存储到变量 NODE1 中。第 6）、7）步的操作过程可用 NODE1=NODE（0，0，0）命令代替。

8）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-0.3，-0.4，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

9）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE2，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

10）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-0.5，-0.6，在第 5 栏中选择



Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

11）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE3，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

12）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

13）选择 Main Menu | General Postproc | Path Operations | Define Path | By Nodes 命令，出现 By Nodes 拾取菜单，在输入栏中输入 NODE1，NODE2，NODE3，单击 OK 按钮，出现 By Nodes 对话框，在 Name Define Path Name:输入栏中输入 KI1，其余选项采用默认设置，单击 OK 按钮关闭该对话框。

14）选择 Main Menu | General Postproc | Nodal Calcs | Stress Int Factor 命令，出现 Stress Intensity Factor 对话框，在 KPLAN Disp extrapolate based on 选项框中选择 Plane strain，其余选项采用其默认设置，单击 OK 按钮，ANSYS 将显示应力强度因子计算结果，如图 8-51 所示。

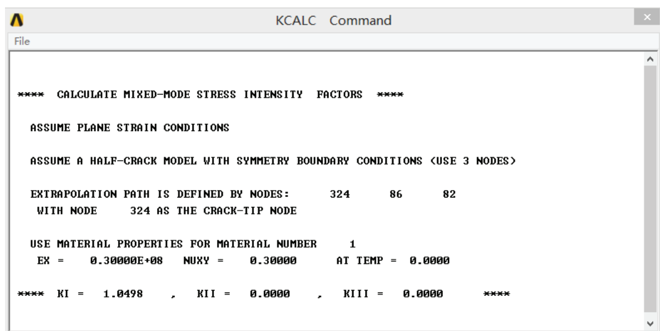


图 8-51 应力强度因子计算结果显示

15）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data，Other operations，单击 OK 按钮，出现 Get Data from Other POST1 Operations 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 KI1，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Strs intens fact，KI，如图 8-52 所示，单击 OK 按钮关闭该对话框。

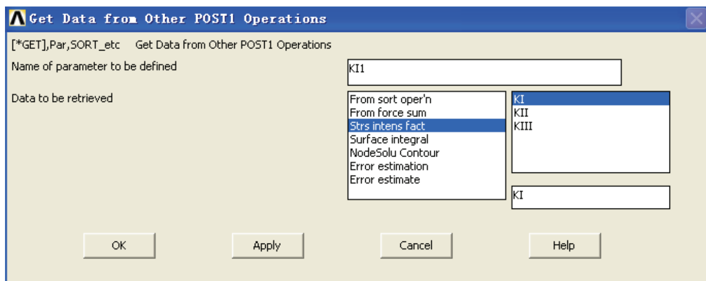


图 8-52 获取参量信息对话框

16）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parame- ters 对话框，在输入栏中输入 CON1=30E6/（1-（0.3*0.3）），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。



17）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cylindrical 命令，将当前坐标系转变为柱坐标系。

18）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，0.8，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入-1，1，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

19）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE4，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Highest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

20）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，0.8，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 35，55，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

21）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE5，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Highest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

22）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，0.8，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 120，145，在第 5 栏中选择 Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

23）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE6，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Highest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

24）选择 Utility Menu | Select | Entities 命令，出现 Select Entities 对话框，在第 1 个下拉选框中选择 Nodes，在第 2 个下拉选框中选择 By Location，在第 3 栏中选择 X coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 0.5，0.8，在第 5 栏中选择 From Full，单击 Apply 按钮，在第 3 栏中选择 Y coordinates，在 Min,Max 输入栏中输入 179，181，在第 5 栏中选择

Reselect，单击 OK 按钮关闭该对话框。

25）选择 Utility Menu | Parameters | Get Scalar Data 命令，出现 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Model data，For selected set，单击 OK 按钮，出现 Get Data for Selected Entity Set 对话框，在 Name of parameter to be defined 输入栏中输入 NODE7，在 Data to be retrieved 列表框中选择 Current node set，Lowest node num，单击 OK 按钮关闭该对话框。

26）选择 Utility Menu | Select | Everything 命令，选择所有实体。

27）选择 Utility Menu | WorkPlane | Change Active CS to | Global Cartesian 命令，将当前坐标系转变为直角坐标系。

28）选择 Utility Menu | Macro | Execute Data Block 命令，出现 Execute Macro Data Block 对话框，参照图 8-53 对其进行输入，单击 OK 按钮关闭该对话框。

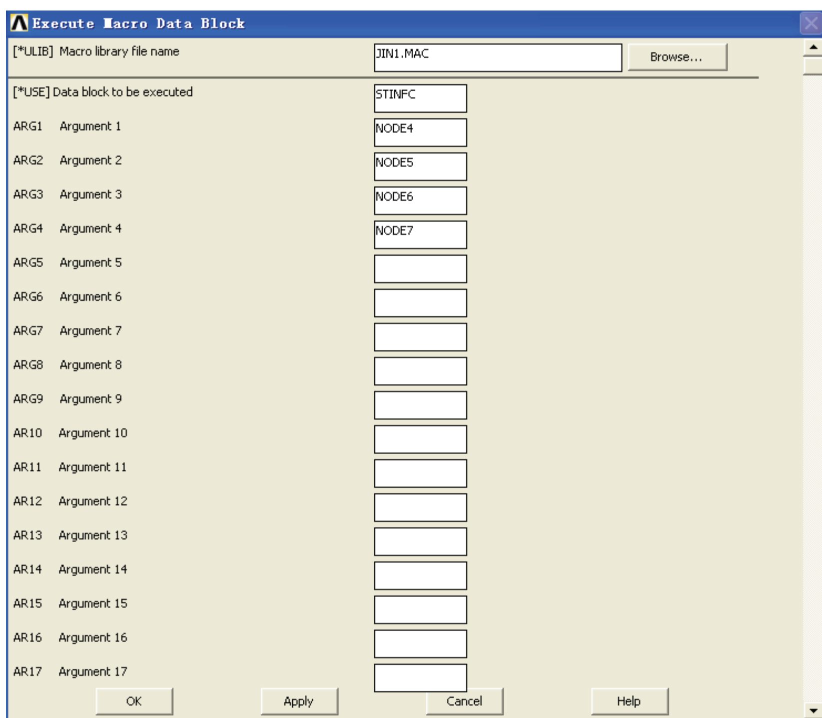


图 8-53 执行宏文件对话框

提示：若出现 Warning 对话框，可单击其上的 Close 按钮关闭之。

29）选择 Utility Menu | Parameters | Scalar Parameters 命令，出现 Scalar Parameters 对话框，在输入栏中输入 KI2=SQRT（CON1*JINT），单击 Accept 按钮，单击 Close 按钮关闭该对话框。

30）选择 Utility Menu | List | Status | Parameters | Named Parameter 命令，出现 Named-Parameters Status 对话框，在 Par Name of parameter 列表框中选择 KI1，其余选项采用默认设置，单击 Apply 按钮，ANSYS 将显示用 KCALC 命令计算得到的应力强度因子，如图 8-54

所示，在 Par　Name of parameter 列表框中选择 KI2，ANSYS 将显示通过 J 积分而得到的应力强度因子，如图 8-55 所示。

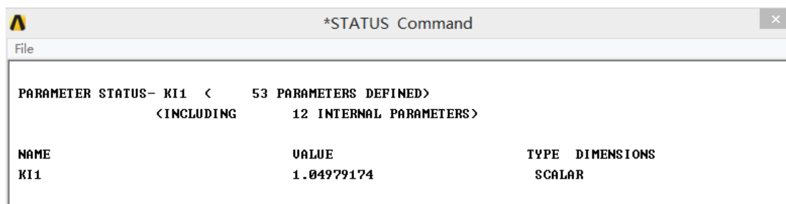


图 8-54　用 KCALC 命令计算得到的应力强度因子结果显示

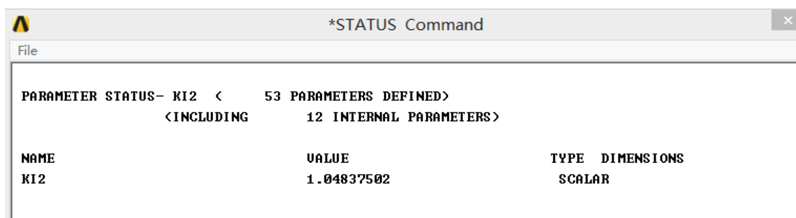


图 8-55　计算 J 积分得到的应力强度因子结果显示

31）选择 Utility Menu | File | Exit 命令，出现 Exit from ANSYS 对话框，选择 Quit－No Save!选项，单击 OK 按钮，关闭 ANSYS。

试一试：读者可采用国际单位制进行建模和求解，比较求解结果和本例求解结果的异同。

8.3.4 命令流

```
/FILNAME，EXERCISE2                    ！定义工作文件名
/TITLE，FRACTURE MECHANIC STRESS INTENSITY - CRACK IN A FINITE WIDTH PLATE
                                       ！定义工作标题

/PREP7                                 ！进入前处理器
ET，1，PLANE182                        ！定义单元类型
ET，2，SOLID185
ET，3，SOLID186
MP，EX，1，3E7                         ！输入弹性模量
MP，PRXY，1，0.3                       ！输入泊松比

*CREATE，FRACT，MAC                    ！创建宏文件，对裂纹前缘单元进行奇异化处理
NSEL，ALL
*GET，N，NODE，，NUM，MAX
CMSEL，S，CRACKTIP                     ！选择组元
ESLN
*GET，ELMAX，ELEM，，NUM，MAX
*DO，IEL，1，ELMAX                     ！开始循环
ELMI=IEL
*IF，ELMI，LE，0，EXIT
```

```
*GET，ELTYPE，ELEM，ELMI，ATTR，TYPE
*IF，ELTYPE，NE，ARG1，CYCLE
N3 = NELEM(ELMI，3)
*IF，NSEL(N3)，LE，0，CYCLE
N7 = NELEM(ELMI，7)
*IF，NSEL(N7)，LE，0，CYCLE
N1 = NELEM(ELMI，1)
N2 = NELEM(ELMI，2)
N5 = NELEM(ELMI，5)
N6 = NELEM(ELMI，6)
X3 = 0.75*NX(N3)
Y3 = 0.75*NY(N3)
Z3 = 0.75*NZ(N3)
X = 0.25*NX(N2)+ X3
Y = 0.25*NY(N2)+ Y3
Z = 0.25*NZ(N2)+ Z3
N = N + 1
N10 = N
N，N10，X，Y，Z
X = 0.25*NX(N1)+ X3
Y = 0.25*NY(N1)+ Y3
Z = 0.25*NZ(N1)+ Z3
N = N + 1
N12= N
N，N12，X，Y，Z
X7 = 0.75*NX(N7)
Y7 = 0.75*NY(N7)
Z7 = 0.75*NZ(N7)
X = 0.25*NX(N6)+ X7
Y = 0.25*NY(N6)+ Y7
Z = 0.25*NZ(N6)+ Z7
N = N + 1
N14 = N
N，N14，X，Y，Z
X = 0.25*NX(N5)+ X7
Y = 0.25*NY(N5)+ Y7
Z = 0.25*NZ(N5)+ Z7
N = N + 1
N16 = N
N，N16，X，Y，Z
N4=N3
N8=N7
NSEL，ALL
TYPE，3
EN，ELMI，N1，N2，N3，N4，N5，N6，N7，N8               ！生成单元
EMORE，0，N10，0，N12，0，N14，0，N16
EMORE，
*ENDDO                                                 ！结束循环
CMSEL，U，CRACKTIP
NUMMRG，NODE
```



```
NSEL，ALL
ESEL，ALL
/GOPR
*END                                    ！结束创建宏文件

*CREATE，JIN1，MAC                      ！创建宏文件，求解 J 积分
STINFC                                  ！定义数据块名称
SEXP，W，SENE，VOLU，1，-1              ！计算应变能密度
PATH，JINT，4，50，48                   ！定义路径
PPATH，1，ARG1                          ！定义路径点
PPATH，2，ARG2
PPATH，3，ARG3
PPATH，4，ARG4
PDEF，W，ETAB，W                        ！将应变能密度映射到路径上
PCALC，INTG，J，W，YG                   ！应变能密度积分计算
*GET，JA，PATH,，LAST，J
PDEF，CLEAR                             ！删除路径变量
PVECT，NORM，NX，NY，NZ                 ！定义路径单位向量
PDEF，INTR，SX，SX                      ！将 X 轴应力映射到路径上
PDEF，INTR，SY，SY                      ！将 Y 轴应力映射到路径上
PDEF，INTR，SXY，SXY                    ！将 Z 轴应力映射到路径上
PCALC，MULT，TX，SX，NX                 ！路径相乘操作
PCALC，MULT，C1，SXY，NY
PCALC，ADD，TX，TX，C1                  ！路径相加操作
PCALC，MULT，TY，SXY，NX
PCALC，MULT，C1，SY，NY
PCALC，ADD，TY，TY，C1
*GET，DX，PATH,，LAST，S
DX=DX/100
PCALC，ADD，XG，XG,,,，-DX/2
PDEF，INTR，UX1，UX
PDEF，INTR，UY1，UY
PCALC，ADD，XG，XG,,,，DX
PDEF，INTR，UX2，UX
PDEF，INTR，UY2，UY
PCALC，ADD，XG，XG,,,，-DX/2
C=(1/DX)
PCALC，ADD，C1，UX2，UX1，C，-C
PCALC，ADD，C2，UY2，UY1，C，-C
PCALC，MULT，C1，TX，C1
PCALC，MULT，C2，TY，C2
PCALC，ADD，C1，C1，C2
PCALC，INTG，J，C1，S
*GET，JB，PATH,，LAST，J
JINT=2*(JA-JB)
PDEF，CLEAR                             ！删除路径变量
*END                                    ！结束创建宏文件

RECTNG，-1，4，0，5                     ！生成矩形面
PCIRC，0.6，0.06,，90                   ！生成 1/4 圆面
```

```
PCIRC，0.6，0.06，90，180
AOVLAP，ALL                                      ！面迭加操作
NUMCMP，ALL                                      ！压缩实体编号
LPLOT                                            ！显示线段
LSEL，S，，，4，8                                 ！选择线段
LSEL，A，，，9，11，2
LESIZE，ALL，，，8                                ！设置线段等分数
AMESH，1，3，2                                    ！对面进行网格划分
ALLSEL                                           ！选择所有实体
LPLOT
LSEL，S，，，1，2
LESIZE，ALL，，，8
ALLSEL
LESIZE，3，，，8，0.2                             ！设置线段单元数量和间距系数
LESIZE，12，，，2
LESIZE，13，，，10，0.2
/NERR，0                                         ！关闭信息提示
AMAP，4，4，9，5，2                               ！对面进行映射网格划分
EPLOT                                            ！显示单元
CSYS，1                                          ！将当前坐标系转变为柱坐标系
N，2000                                          ！生成节点
N，2001，0.06
N，2021，0.06，11.25
N，2100，，，0.25
N，2101，0.06，，0.25
N，2120，0.06，11.25，0.25
TYPE，2
EN，500，2001，2021，2000，2000，2101，2120，2100，2100
                                                 ！由节点生成单元
EGEN，16，200，500，，，，，，，，，11.25            ！复制单元
ESEL，S，TYPE，，2                                ！选择单元
/VIEW，1，1，2，3                                 ！设置视图显示方向
EPLOT
ALLSEL
CSYS，0                                          ！将当前坐标系转变为直角坐标系
ESIZE，，1                                        ！设置单元数量
VOFFST，1，0.25                                  ！拖拉面生成体
APLOT                                            ！显示面
VOFFST，3，0.25
VOFFST，4，0.25
ACLEAR，ALL                                      ！清除面网格
APLOT
ADELE，2
NUMMRG，NODE                                     ！合并节点
NUMMRG，KP                                       ！合并关键点
NUMCMP，ALL                                      ！压缩实体编号
NSEL，S，LOC，X，0                                ！选择节点
NSEL，R，LOC，Y，0
CM，CRACKTIP，NODE                               ！生成节点组元
FRACT，2                                         ！执行宏文件
```



```
/NERR，DEFA
ESEL，S，TYPE，，3                          ！选择单元
EPLOT
ALLSEL
/TITLE，FINITE ELEMENT MODEL
EPLOT
FINISH

/SOLU                                       ！进入求解器
ANTYPE，STATIC                              ！指定分析类型
OUTPR，ALL，ALL
NSEL，S，LOC，X，-1                         ！选择节点
DSYM，SYMM，X                               ！施加对称位移约束
NSEL，S，LOC，X，0，4
NSEL，R，LOC，Y，0
DSYM，SYMM，Y
ALLSEL
D，ALL，UZ                                  ！施加位移约束
NSEL，S，LOC，Y，5
SF，ALL，PRES，-0.56                        ！施加压力载荷
ALLSEL
LOCAL，11，0，0，0，0，，，，1，1           ！创建局部坐标系
SOLVE                                       ！开始求解计算
FINISH

/POST1                                      ！进入 POST1 后处理器
PLNSOL，U，X                                ！绘制 X 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，Y                                ！绘制 Y 方向位移场等值线图
PLNSOL，U，SUM                              ！绘制合位移场等值线图
PLNSOL，S，EQV                              ！绘制等效应力等值线图
ETABLE，SENE，SENE                          ！存储应变能到单元列表中
ETABLE，VOLU，VOLU                          ！存储体积到单元列表中
NSEL，S，LOC，Y，0                          ！选择节点
NSEL，R，LOC，X，0                          ！二次选择节点
*GET，NODE1，NODE，，NUM，MIN               ！获取节点编号
NSEL，S，LOC，Y
NSEL，R，LOC，X，-0.3，-0.4
*GET，NODE2，NODE，，NUM，MIN
NSEL，S，LOC，Y
NSEL，R，LOC，X，-0.5，-0.6
*GET，NODE3，NODE，，NUM，MIN
ALLSEL
PATH，KI1，3，，48                          ！定义路径
PPATH，1，NODE1                             ！定义路径点
PPATH，2，NODE2
PPATH，3，NODE3
KCALC，，，1                                ！计算应力强度因子
*GET，KI1，KCALC，，K，1

CON1=30E6/(1-(0.3*0.3))
```

```
CSYS，1                                      ！将当前坐标系转变为柱坐标系
NSEL，S，LOC，X，0.5，0.8                     ！选择节点
NSEL，R，LOC，Y，-1，1                        ！二次选择节点
*GET，NODE4，NODE，，NUM，MAX                 ！获取节点编号
NSEL，S，LOC，X，0.5，0.8
NSEL，R，LOC，Y，35，55
*GET，NODE5，NODE，，NUM，MAX
NSEL，S，LOC，X，0.5，0.8
NSEL，R，LOC，Y，120，145
*GET，NODE6，NODE，，NUM，MAX
NSEL，S，LOC，X，0.5，0.8
NSEL，R，LOC，Y，179，181
*GET，NODE7，NODE，，NUM，MIN
ALLSEL                                       ！选择所有实体
CSYS，0                                      ！将当前坐标系转变为直角坐标系
*ULIB，JIN1，MAC
*USE，STINFC，NODE4，NODE5，NODE6，NODE7        ！调用宏文件
CON1=30E6/(1-(0.3*0.3))
KI2=SQRT(CON1*JINT)                          ！由J积分计算应力强度因子
*STATUS，KI1                                 ！显示KI1
*STATUS，KI2                                 ！显示KI2
FINISH
/EXIT                                        ！退出ANSYS
```

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆 瓣 网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 16.1 结构分析工程应用实例解析 第4版

ANSYS系列已出版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

- ANSYS 16.1结构分析工程应用实例解析 第4版
- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0 从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析


机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-54312-1

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-54312-1
策划编辑◎张淑谦
封面设计◎子时文化 ZiShi Culture

51CTO.com
技术成就梦想



定价：89.00元